

**VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Chování elektrického oblouku při různých
parametrech napájecí sítě
(Electric arc behavior over different
parameters of electrical power network)**

2010

Bc. Petr Caputa

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D za odbornou asistenci při zpracování této práce, jakož i za poskytnutí potřebných tiskovin a celkový odborný dohled při tvorbě mé diplomové práce. Předání jeho cenných rad a zkušeností bylo pro tuto práci velkým přínosem.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Chování elektrického oblouku při různých parametrech napájecí sítě“ vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. 5. 2010

.....

Bc. Petr Caputa

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá elektrickým obloukem a jeho chováním při různých parametrech napájecí sítě. V úvodních kapitolách, které jsou zaměřeny spíše teoreticky, je popsána základní identifikace elektrických výbojů v elektrizačních soustavách a jejich lokalizace pomocí senzorů. Je zde rovněž uvedeno a rozebráno základní rozdělení sítí VN, jakož i popis funkce protiobloukové ochrany PO1.

Navazující kapitoly práce jsou pak zaměřeny na praktická měření a experimenty. Jejich obsahem je výsledek práce, kde na navrženém testovacím pracovišti probíhala série měření, sloužících k otestování funkce protiobloukové ochrany PO1 a zkoumání chování elektrického oblouku hořícího mezi elektrodami vůbec.

Klíčová slova: elektrický oblouk, protioblouková ochrana, vysokonapěťová síť, zemní spojení

Abstract

This thesis deals with the electric arc and its behavior at different parameters of power supply. In introductory chapters, which are focused theory is described the basic identification of electric discharges in the electricity systems and their localization by means of sensors. There is also indicates and discusses the basic distribution of high voltage network, as well as a description of the fiction of counter-arc protection PO1.

Follow chapters of the work are then devoted to practical measurement and experiments. Their content is a result of the work, where on proposed test site ran a series of measurements, used to test the fiction of counter-arc protection PO1 and examining the behavior of an electric arc burning between the electrodes at all.

Key words: electric arc, counter-arc protection, high voltage network, ground fault

Seznam použitých symbolů a zkratek

ε_i	chyba amplitudy proudu ($^{\circ}$, rad)
Φ	magnetický tok (Wb)
φ_i	chyba fáze (%)
μ_0	permeabilita vakua ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
ω	úhlová frekvence ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
ΔP_k	činný výkon nakrátko (W)
ΔP_0	činný výkon naprázdno (W)
A	plocha (m^2)
B	elektromagnetická indukce (T)
C	kapacita (F)
$C_{0, 01, 02, 03}$	kapacita jednotlivých vodičů proti zemi (F)
C_k	kapacita proti zemi (F)
C_s	mezifázová kapacita (F)
C_{nes}	obecně kapacitní nesymetrie (F)
$\cos\varphi$	účinník (-)
$E_{l,2}$	křivka stability hoření el.oblouku ($\text{V}\cdot\text{mm}^{-1}$)
F	síla (N)
f	frekvence (Hz)
I	elektrický proud (A)
$I_{1, 1n, 2, 2n}$	primární a sekundární (jmenovitý) proud přístrojového transformátoru (A)
$I_{C01, C02, C03}$	kapacitní proud fázových vodičů tekoucí do země (A)
$I_{C12, C23, C31}$	kapacitní proud tekoucí mezi fázemi (A)
I_C	kapacitní proud soustavy (A)

I_{ke}	proud obloukem při proměnném tlaku a teplotě (A)
I_N	jmenovitý proud (A)
I_{mag}	magnetizační proud (A)
$I_{p, por}$	poruchový proud (A)
I_{ZT}	proud zhášecí tlumivkou (A)
l	délka (m)
l_{arc}	délka oblouku (mm)
l_d	vzdálenost elektrod (mm)
j	imaginární jednotka komplexního čísla (-)
$k_{1,2,3}$	obecné konstanty z oboru čísel R^+ (-)
L_1, L_2, L_3	obecné označení fáze třífázového rozvodného systému
$L_{1,2}$	indukčnost (H)
L_{zt}	indukčnost zhášecí tlumivky (H)
M	vzájemná indukčnost (H)
N	závit (-)
p	tlak (Pa)
p	převod transformátoru (-)
P	činný příkon / výkon (W)
r_o	rezistence (Ω)
R	činný odpor (Ω)
$R_{1,2}$	činné odpory prvků (Ω)
R_{Fe}	ztráty v železe (Ω)
R_p	poruchový odpor (Ω)
R_{ZT}	ztrátový odpor (Ω)
S_n	jmenovitý výkon (kVA)

S_{nT}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru (kVA)
t	čas (s)
T	termodynamická teplota (K)
u_o	obloukové napětí (V)
u_{Rp}	napětí indukované v Rogowského pásku (V)
$u_{závit}$	napětí indukované v závitu (V)
U	napětí (V)
$U_{0, N}$	napětí uzlu systému proti zemi (V)
$U_{01, 02, 03}$	fázová napětí systému proti zemi (V)
$U_{1, 2, 3}$	fázová napětí systémových zdrojů (V)
U_{0ef}	efektivní hodnota obloukového napětí (V)
U_f	fázové napětí (V)
U_{IN}	vstupní napětí (V)
U_k	jmenovité napětí nakrátko (V)
U_{nT}	jmenovité napětí transformátoru (V)
U_s	sdružené napětí (V)
U_{LIM}	limitní napětí (V)
U_n	jmenovité napětí (V)
U_{OUT}	výstupní napětí (V)
$x(t)$	obecná, časově proměnná veličina (-)
X	reaktance (Ω)
$Z_{(1)}$	sousledná složka impedance (Ω)
$Z_{(2)}$	zpětná složka impedance (Ω)
Z_N	jmenovitá impedance (H)

Z	napět'ový zdroj
T	transformátor
RLC	model vedení
C	kondenzátorová baterie
S1	stykač č.1
S2	stykač č.2
arc	obloukové jiskřiště
R	odporník
OZ	operační zesilovač
vn	síť vysokého napětí
vvn	síť velmi vysokého napětí

Obsah

Úvod.....	9
1 IDENTIFIKACE VÝBOJŮ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	10
1.1 Elektrizační soustava.....	10
1.2 Definice elektrického oblouku	10
1.3 Senzory oblouku	12
1.3.1 Senzory tlaku.....	13
1.3.2 Optické senzory.....	15
1.3.3 Senzory napětí	16
1.3.4 Senzory proudu	18
2 ROZBOR PROVOZU VN SÍTÍ	22
2.1 Sítě VN s izolovaným uzlem.....	22
2.2 Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost.....	23
2.3 Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes odpor	25
2.4 Soustava s přímo uzemněným uzlem	26
3 PRINCIP PŮSOBENÍ PROTIPOUKOVÉ OCHRANY	27
3.1 Základní členy ochrany.....	27
3.2 Protioblouková ochrana PO1.....	28
3.2.1 Ovládání a nastavení PO1	29
4 NÁVRH TESTOVACÍHO PRACOVISTĚ PRO OVĚŘENÍ PROTIPOUKOVÉ OCHRANY	
31	
4.1 Popis fyzikálního modelu	31
4.2 Výkonový transformátor	36
4.3 Fyzikální model sítě.....	37
4.4 Výpočet parametrů soustavy pro simulaci reálné VN sítě	38
4.5 Nároky na protiobloukovou ochranu na hladině VN.....	39

5	OVĚŘENÍ FUNKCE PROTIOBLOUKOVÉ OCHRANY NA FYZIKÁLNÍM MODELU	
	REÁLNÉ VN SÍŤ	40
5.1	Nízkoohmové zemní spojení.....	40
5.2	Vysokoohmové zemní spojení	41
5.3	Parametry elektrického oblouku	43
5.4	Stabilita hoření elektrického oblouku	46
5.5	Mez stability elektrického oblouku	47
	ZÁVĚR.....	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51

Úvod

V elektrotechnice je elektrický oblouk vznikající při poruše velmi nežádoucím činitelem. Vznikne-li tento výboj v elektrizační soustavě, většinou to vede ke způsobení hmotných škod na zařízeních a s tím spojených finančních ztrát. Proto se snažíme tento jev omezit na co nejkratší dobu hoření, respektive předejít vzniku elektrického oblouku v elektrizační soustavě vůbec. Pro tyto účely jsou vyvíjeny nejrůznější typy protiobloukových ochran, které mají za úkol zkoumat parametry elektrizační soustavy a při nežádoucím zapálení elektrického oblouku tento bezpečně vypnout. Aby mohla takováto protioblouková ochrana správně působit, je třeba znát parametry a chování elektrického oblouku při různých parametrech napájecí sítě.

V této práci jsou shrnuty základní teoretické znalosti o možnosti identifikace a lokalizace elektrického oblouku v elektrizační soustavě a rozdělení používaných sítí VN. Na základě těchto teoretických znalostí se pak tato práce zabývá zkoumáním parametrů elektrického oblouku hořícího mezi elektrodami na fyzikálním modelu VN sítě a testováním reakce protiobloukové ochrany PO1.

1 IDENTIFIKACE VÝBOJŮ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

1.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustava zahrnuje veškerá elektrická zařízení sloužící k výrobě elektrické energie, k jejímu přenosu a rozvodu k jednotlivým spotřebitelům. Na jejím začátku jsou výrobní elektrické energie s alternátory a transformátory, na které navazuje přenosová soustava a rozvodné (distribuční) soustavy. Přenosová soustava je tvořena v elektrárně vedením velmi vysokého napětí, které končí ve velkých elektrických stanicích. Rozvodné soustavy slouží pro dodávku elektrické energie jejím odběratelům a jsou tvořeny distribučními sítěmi, elektrickými stanicemi a rozvody k jednotlivým spotřebičům. Kromě výše uvedeného zařízení, které slouží pro výrobu, přenos, rozvod a spotřebu elektrické energie obsahuje elektrizační soustava celou řadu zařízení, která slouží k zajištění řádného bezpečného a spolehlivého provozu celé soustavy.

1.2 Definice elektrického oblouku

Volně hořící elektrický oblouk představuje výkonný zdroj tepelné a světelné energie a jeho vznik je provázen tlakovou vlnou. Hoření oblouku se projevuje v oblasti optického záření, elektromagnetického pole, ultrazvuku a v napájecí soustavě zpravidla růstem proudu a poklesem napětí. Hoření oblouku je rovněž provázeno vznikem nestacionarit v napájecím napětí a proudu.

Volně hořící oblouk je považován v elektrizační soustavě za negativní jev, protože zapříčiňuje svými destruktivními účinky materiální škody. V případě jeho vzniku v prostředí s hořlavými látkami může vyvolat svými tepelnými účinky požár. V některých případech může být rovněž příčinou úrazu osob vyskytujících se v oblasti vzniku oblouku. Elektrický oblouk prakticky nelze uhasit, pokud hoří, a proto je nutno zkrátit dobu jeho hoření na minimum. To znamená okamžité vypnutí oblouku od zdroje, ze kterého je napájen. Odpojení elektrického zařízení s hořícím obloukem přináší ztráty související s přerušením výroby.

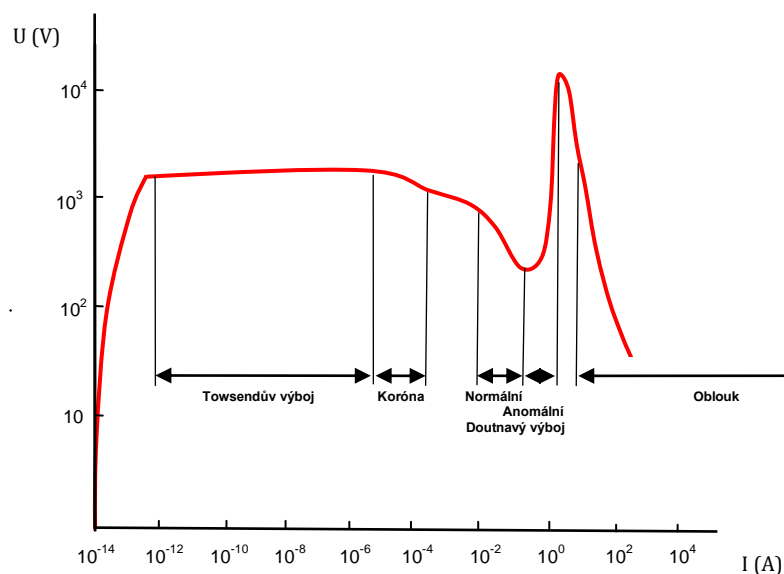
Elektrický oblouk je výboj v plynu, vznikající za normálního, nebo zvýšeného tlaku, schopný existovat libovolně dlouhou dobu, pokud není přerušen vhodným zásahem do jeho mechanismu. Mezi hlavní charakteristické znaky oblouku patří:

- Vysoká teplota katodové skvrny nebo celé katody, dostačující k tepelné emisi elektronů
- Vysoká proudová hustota katodové skvrny (přibližně 10^7 A.m^{-2})
- Malé úbytky napětí v katodové a anodové oblasti
- Malé napětí na elektrodách vzhledem k napájecímu napětí
- Vysoká teplota obloukového plazmatu
- Intenzivní vyzařování světla z oblouku

Podle druhu napájení dělíme oblouky na střídavé a stejnoseměrné. Oba druhy můžeme dále dělit na oblouky s uhlíkovými nebo kovovými elektrodami. Podle tvaru výbojové dráhy dělíme oblouky na volně hořící s nepravidelným tvarem a oblouky stabilizované s pravidelným osově souměrným tvarem. Zvláštní kategorii tvoří spínací oblouky. U volně hořícího oblouku je ve většině případů plazma výboje tvořeno plynem (vzduchem), ve kterém oblouk hoří a přimíseninami z elektrod.

Střídavý oblouk udržován střídavým proudem, je charakterizován periodicky se měnící polaritou elektrod, periodicky proměnným napětím na elektrodách a periodicky proměnným proudem. Důsledkem této periodicity napětí a proudu jsou periodické i ostatní veličiny. U volně hořícího oblouku je vlivem jeho nepravidelného hoření tvar každé periody napětí a proudu jiný [1,2].

Charakteristika elektrických výbojů, pro snadnější orientaci na jaké napěťové a proudové hladině se jednotlivé výboje nacházejí



obr.1-1 Výboje [1]

Abychom mohli elektrický oblouk v elektrizační soustavě identifikovat a lokalizovat ho, potřebujeme k tomu zařízení, které je v přímém styku s měřeným prostředím. K tomuto účelu používáme senzory.

1.3 Senzory oblouku

Senzor snímá sledovanou veličinu a transformuje ji na měřenou, nejčastěji elektrickou veličinu. Má stejný význam jako snímač, anebo ho lze nazvat popudovým členem, což je termín používaný v terminologii ochran. Citlivá část senzoru bývá označována termínem čidlo.

Senzory se dále dělí **podle měřené veličiny**, kterou bývá teplota, tlak, záření různého spektra, mechanické veličiny, elektrické a magnetické veličiny, atd.

Podle fyzikálního principu jsou senzory odporové, indukční, kapacitní, magnetické, piezoelektrické, pyroelektrické, optoelektronické, optické, vláknové, chemické, atd.

Aktivní senzory jsou ty, které se chovají působením snímané veličiny jako zdroje elektrické energie. **Pasivní** senzory potřebují ke své činnosti napájení.

Inteligentní senzory obsahují obvody jak pro zpracování, tak pro analýzu a unifikaci signálu v jediném kompaktním provedení.

Technické parametry senzorů lze rozdělit na statické a dynamické. Statické parametry jsou např. citlivost, dynamický rozsah, reprodukovatelnost, rozlišitelnost, chyby a linearita. Mezi dynamické parametry patří např. časová konstanta, šířka frekvenčního pásma, frekvenční rozsah a parametry.

Elektrický obloud lze analyzovat bezdotykovými pasivními nebo aktivními senzory. Primární měřenou veličinou může být teplota, tlak a jeho projevy v oblasti ultrazvuku, záření, elektrické a magnetické veličiny. Sekundární měřené veličiny jsou pak plyny, které jsou produktem hoření vyvolaného tepelnými účinky oblouku.

1.3.1 Senzory tlaku

Tlak prostředí je definován jako poměr elementu síly, který působí na element plochy dle vztahu:

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (\text{r. 1-1})$$

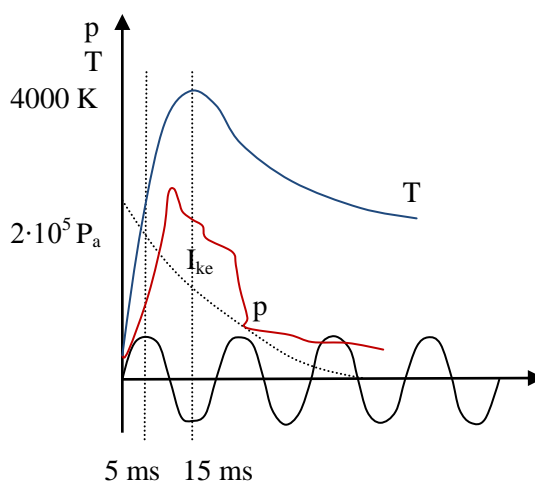
Převod tlaku na elektrickou veličinu se zpravidla děje přímo, nebo nepřímo přes pružný člen. Mezi nejčastěji používané senzory tlaku patří deformační, kapacitní, piezoelektrické,

optoelektronické, odporové, magnetické a rezonanční senzory. Princip diagnostiky elektrického oblouku pomocí tlaku je založen na rozpínání plynů vlivem prudkého nárůstu jejich teploty v uzavřeném prostoru. Ve své podstatě se jedná o izochorický děj, pro který platí Charlesův zákon, který zároveň vlivem netěsností zařízení přechází v děj adiabatický.

Charlesův zákon $\frac{P}{T} = konst$ (r.1-2)

Při izochorickém ději plyn nekoná mechanickou práci, ale pouze se mění vnitřní energie plynu. Naopak při adiabatickém ději plyn koná práci W na úkor své vnitřní energie. Tato „práce“ má však v reálném provozu negativní charakter a způsobí mechanické poškození zařízení.

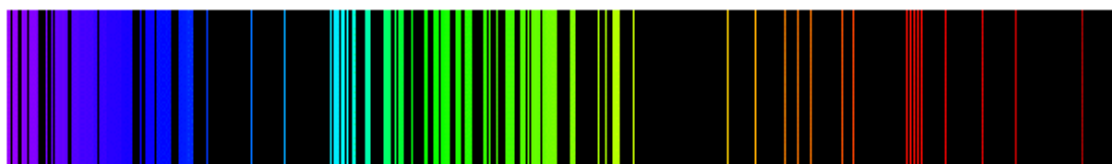
Identifikace elektrického oblouku na principu měření tlakové vlny spočívá ve sledování tlaku chráněného prostoru a jeho srovnání s referenčním tlakem v okolí. Nevýhodou tohoto principu je možnost použití pouze na uzavřené prostory a rozvaděče. Maximální doba hoření oblouku nepřesahuje 100 ms. Pro spolehlivou identifikaci oblouku je nutné, aby vznikla tlaková vlna dostatečné intenzity, což může být problematické u vysokoimpedančních a sériových oblouků, kdy je energie takovýchto oblouků nedostatečná k vybavení chránicího systému.



obr.1-2 Časový záznam parametrů oblouku [6]

1.3.2 Optické senzory

Oblast optického záření je v rozmezí vlnových délek 10^2 až 10^5 nm. Do této oblasti patří ultrafialové, viditelné a infračervené záření. Hoření oblouku je doprovázeno silným optickým zářením. Toto záření je prakticky identifikovatelné okamžitě po jeho vzniku, a proto jsou optické senzory velmi rychlé. V současné době se pro přenos signálu používají optické kabely, které zároveň slouží i jako senzory a jsou navíc odolné proti elektromagnetickému rušení. Použití těchto senzorů je opět omezeno pouze na uzavřené prostory a rozváděče. Většinou jsou tyto senzory kombinovány se senzory proudu, tak aby se předešlo falešné reakci např. při otevření rozváděče. Falešnou reakci ochrany je možné eliminovat použitím filtrů propouštějící pouze určité vlnové délky, které přísluší spektrálním čarám prvků použitých v elektrické výstroji zařízení, např. Al, Fe, Cu, Mn, O. Příklad spektrálních čar železa je uveden na obr.1-3.

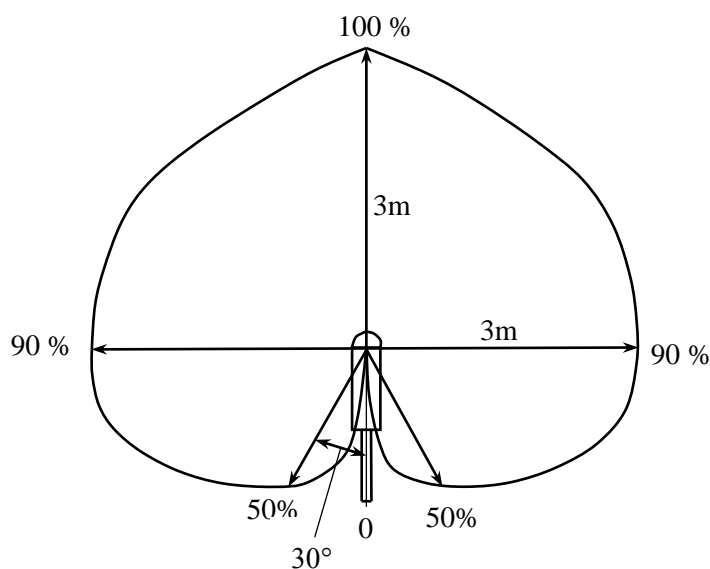


obr.1-3 Spektrální čáry jednotlivých prvků, nejčastěji používaných pro výrobu výbojek
[6]

Záření elektrického oblouku je identifikovatelné prakticky v první milisekundě, a proto jsou senzory optického záření velmi rychlé. Moderní koncepce senzorů využívají k přenosu světla optických kabelů

Existují dvě modifikace využití optických kabelů:

- První modifikace používá optické kabely, na jejichž konci se nachází spojná čočka. Konec kabelu se pak umístí do prostoru s největší pravděpodobností vzniku oblouku. Na obr.1-4 je vyznačen prostor, ve kterém je zajištěno působení senzoru. Do tohoto prostoru senzor „vidí“.



obr.1-4 Oblast působení senzoru [6]

- Druhá modifikace použití optických kabelů vychází z použití kabelu, který umožňuje vstup optického záření z elektrického oblouku podél jeho délky.

Maximální doba hoření oblouku je srovnatelná s dobou hoření oblouku při použití tlakových senzorů. Optické senzory identifikují sériové i vysokoimpedanční oblouky. Jejich působnost se ovšem omezuje na uzavřené rozvaděče.

1.3.3 Senzory napětí

Senzory napětí slouží k úpravě velikosti měřeného napětí na hodnoty vhodné pro následné zpracování. Mezi napěťové senzory patří zejména napěťové transformátory. Dále pak odporové, kapacitní a kombinované napěťové děliče.

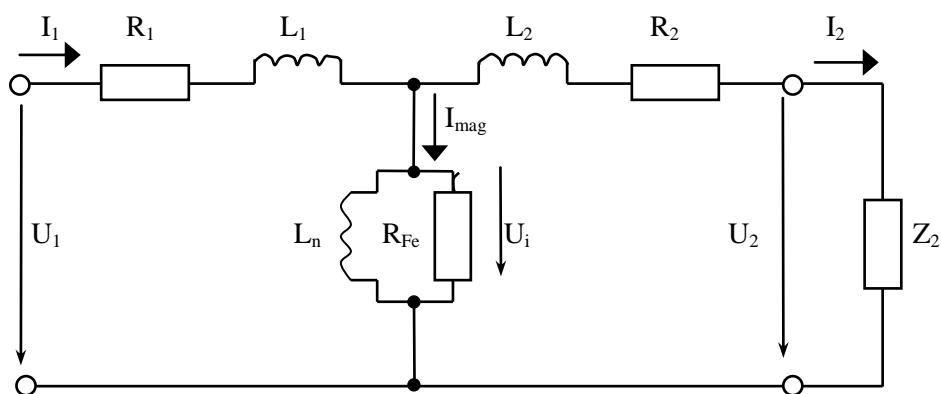
V rozvodnách a transformátorových stanicích vysokého napětí jsou v současné době nasazovány výhradně přístrojové transformátory napětí. Hlavními cíly těchto přístrojových transformátorů jsou:

- Úprava velikosti měřeného napětí na hodnoty bezpečně měřitelné
- Galvanické oddělení silových a měřících obvodů

Nevýhodou přístrojových transformátorů je, že představují další prvek v měřicím obvodu vnášející do měřeného signálu chybu. Tyto chyby můžeme definovat jako chybu amplitudy ε a chybu fáze φ .

Principiálně jsou přístrojové transformátory obdobné jako silové, pouze jejich konstrukce je zaměřena na zajištění požadovaného transformačního výkonu pro jmenovitou frekvenci při maximální dovolené chybě amplitudy a fáze. Výkonové transformátory jsou konstruovány s ohledem na dosažení definovaného transformačního výkonu při minimálním oteplení a napěťovém úbytku. Z hlediska stavby přístrojových transformátorů má výrazný vliv měřené napětí, tzn. izolační hladina napětí.

Ideální přístrojový transformátor by měl mít hodnotu výstupní veličiny přímo úměrnou vstupní hodnotě a se stejnou fází podle převodu, čehož nelze v praxi zcela dosáhnout. Při výpočtu chyby amplitudy a fáze reálného přístrojového transformátoru napětí, budeme vycházet z náhradního schématu transformátoru se zanedbáním parazitních kapacit mezi závity a mezi vinutími pro nízké kmitočty a s lineární hysterezí, který je zobrazen na obr.1-5.



obr.1-5 Náhradní schéma měřicího transformátoru napětí [6]

1.3.4 Senzory proudu

Mezi nejčastěji používané senzory proudu patří mimo proudových transformátorů také bočníky, Hallovy sondy, LEM čidla a Rogowského cívka. Stejně jako napěťové, tak i proudové transformátory se dělí na měřicí a jistící. Na rozdíl od napěťových, musí proudové transformátory zajistit, aby velikost proudu v primárním obvodu byla nezávislá na velikosti připojeného břemene na sekundárním vinutí.

Vzhledem k podmínce minimálního ovlivnění elektrického obvodu připojeným primárním vinutím transformátoru, jsou hodnoty jednotlivých prvků R_{v1} , L_{r1} a L_{r2} velmi malé, až zanedbatelné.

Vzhledem k tomu, že proud procházející primárním vinutím I_1 vybudí magnetický tok Φ , čímž se na sekundární straně obvodu transformátoru indukuje proud I_2 , můžeme následně psát zjednodušený vztah pro proudové poměry:

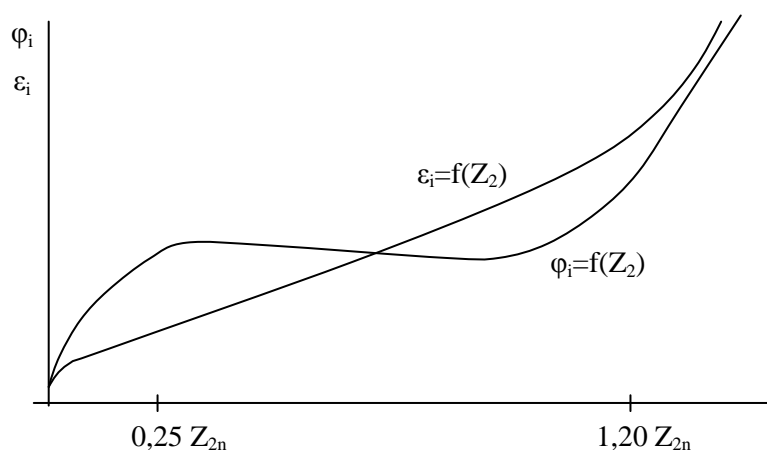
$$\Phi \approx N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (\text{r.1-3})$$

Následně je jmenovitý převod definován:

$$p_1 = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{r.1-4})$$

Stejně tak jako pro napěťové, tak i pro proudové transformátory jsou definovány třídy přesnosti. Třída přesnosti platí pro definované pracovní rozsahy jmenovitého proudu $10 \div 120 \% I_N$ a $\cos \varphi$ $Z_2=0,8$. Impedance břemene se pohybuje v intervalu $25 \div 100 \% Z_n$ pro třídu přesnosti do 1 % a pro větší třídy přesnosti je v intervalu $50 \div 100 \% Z_n$. Vzhledem k závislosti proudu magnetického obvodu na frekvenci, platí daná třída přesnosti vždy pouze pro jmenovitou frekvenci.

Výše uvedené závěry platí, pokud se magnetický obvod nachází v lineární části magnetické smyčky. Pokud bychom na sekundární straně transformátoru zvyšovali zátěž, tak obdobně by docházelo ke zvyšování proudu v tomto obvodu a to podle převodového poměru transformátoru, čímž by se zároveň zvyšoval i úbytek napětí na zátěži U_2 , až na hodnotu tzv. limitního napětí U_{LIM} . V tomto okamžiku dojde k nasycení jádra, což má za důsledek prudký nárůst chyby měření, viz obr.1-6.



obr.1-6 Závislosti chyby amplitudy ε_i a φ_i na velikosti zátěže [6]

Z obrázku je zřejmé, že opět existuje možnost aktivně, pomocí vhodně zvolené velikosti měřicího břemene, minimalizovat vliv chyb amplitudy a fáze na měření.

Pro měření nestejnosměrných proudů, zejména přechodových jevů se jako velmi výhodné jeví použití Rogowského pásku. **Rogowského pásek** představuje prstencovou cívku bez magneticky vodivého jádra z důvodu nízké indukčnosti. Ve středu prstence je umístěn vodič s měřeným průběhem proudu. Vzhledem k tomu, že Rogowského pásek nemá magnetické jádro, je proto schopen lineárně reprodukovat i velmi vysoké hodnoty proudu, protože nedochází k saturaci magnetického obvodu. Zároveň z důvodu nízké indukčnosti je možné přesně měřit i velmi vysoké frekvence proudu a pulsy. Pro správnou funkci je nutné, aby cívka byla velmi homogenní, protože pak je velmi odolná proti vnějším (parazitním) magnetickým polím. Z tohoto důvodu se jedná o senzor vhodný pro měření jak atmosférických výbojů, tak i

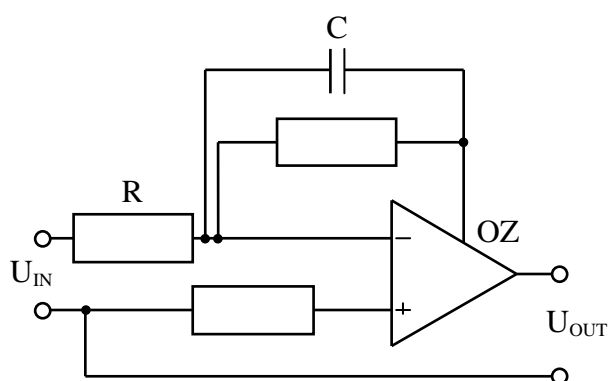
výkonových obvodů a především vysokých frekvencí a velkých proudů. Princip Rogowského pásku spočívá v elektromagnetické indukci, kdy při průchodu proudem měřeným vodičem je v pásku indukováno napětí o velikosti, viz r.1-5. Kdy v jednom závitě pásku je indukováno napětí úměrné změně hustoty magnetického pole $\frac{dB}{dt}$ a ploše ohraničené jedním závitěm A v čase dt (periodě).

$$u_{závit} = \frac{d\phi}{dt} = A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (r.1-5)$$

Výsledná hodnota indukovaného napětí v Rogowského pásku o N závitěch je pak:

$$u_{Rp} = \frac{N \cdot A \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (r.1-6)$$

Pro získání hodnoty napětí úměrné velikosti proudu je nutné použít integrátor. Nejčastěji se používá aktivní integrátor s operačním zesilovačem, který ale musí mít dostatečnou frekvenční odezvu a schopnost řídit kapacitu C podle frekvence, např. obr.1-7



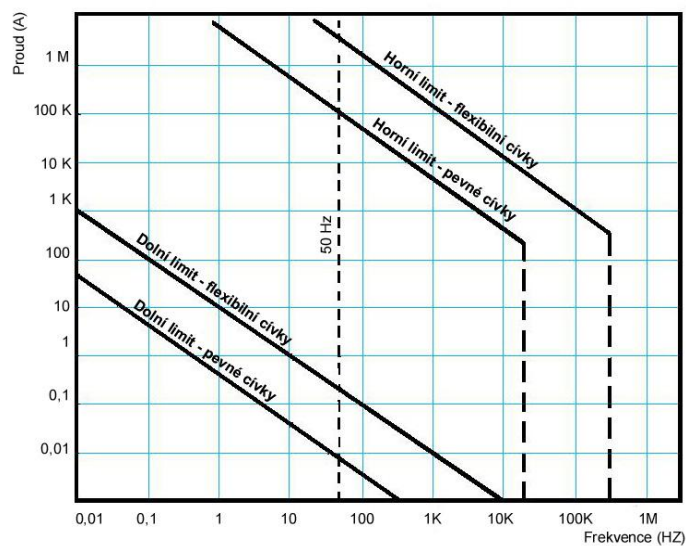
obr.1-7 Příklad zapojení operačního zesilovače pro použití s Rogowského páskem [6]

V integračním obvodu musí být zapojen svodový odpor přes kondenzátor a jeho velikost musí být dostatečně malá, aby nedocházelo k ovlivňování integrovaných frekvencí.

Výsledné výstupní napětí Rogowského cívky s integračním členem je:

$$U_{out} = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \frac{N \cdot A \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot I \quad (r.1-7)$$

Z výše popsaného principu funkce Rogowského cívky vyplývá, že její optimální použití je právě pro měření přechodových dějů jako je elektrický oblouk. Na obr.1-8 jsou zobrazeny rozsahy použití jednotlivých typů. Horní limit je dán výstupním napětím, kdy v případě velkých proudů a vysokých frekvencí by mohlo dojít k přeskoku. Dolní hranice je omezena šumem proudového snímače. Pro nízké frekvence a proudy se nejlépe hodí pevné cívky, které mají větší vzájemnou indukčnost, případně je možné vícekrát obtočit měřený vodič kolem pevné cívky, resp. flexibilní cívku obtočit kolem vodiče. Frekvenční omezení je dáno vlastním rezonančním kmitočtem každé cívky -přerušované svislé čáry v grafu na obr. 1-8 [6].



obr.1-8 Graf pracovních oblastí různých typů Rogowského pásku

2 ROZBOR PROVOZU VN SÍTÍ

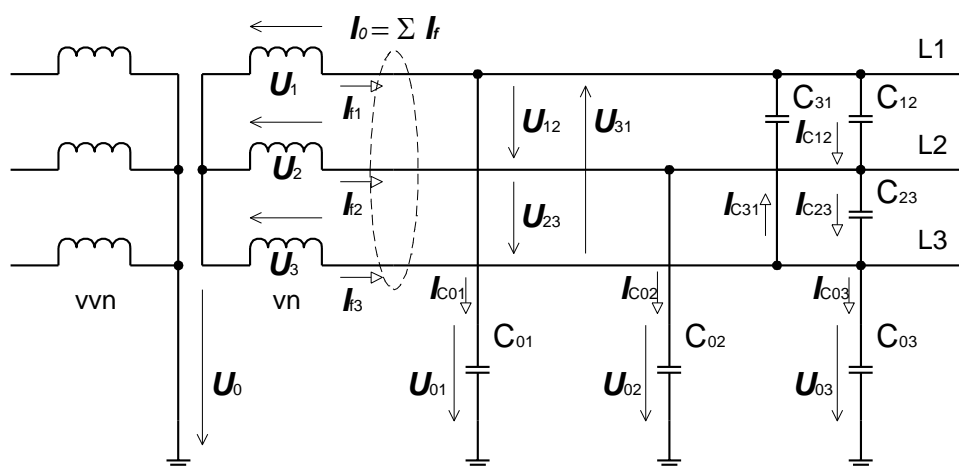
Rozdělení sítí VN

- Soustava s izolovaným uzlem
- Soustava s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost
- Soustava s nepřímo uzemněným uzlem přes odpor
- Soustava s přímo uzemněným uzlem

2.1 Sítě VN s izolovaným uzlem

V těchto sítích nejsou mezi uzlem a zemí a ani mezi fázemi a zemí připojeny žádné impedance. Výjimky zde mohou tvořit jednofázové přístrojové transformátory napětí a pochopitelně síťové kapacity proti zemi se svodovými odpory (Poměr kapacitní susceptance a svodové admitance se pohybuje u běžných vedení ($20 \div 50$) ku 1).

Při popisu poměrů v nezatížené síti s izolovaným uzlem je možné vycházet z předpokladu, že napájecí napětí zdroje jsou symetrické, kapacity všech fází vzhledem k zemi jsou stejné, vzájemné kapacity jsou stejné, síť není zatížena odběrem a svodové odpory lze zanedbat [9].



obr.2-1 Izolovaná síť [9]

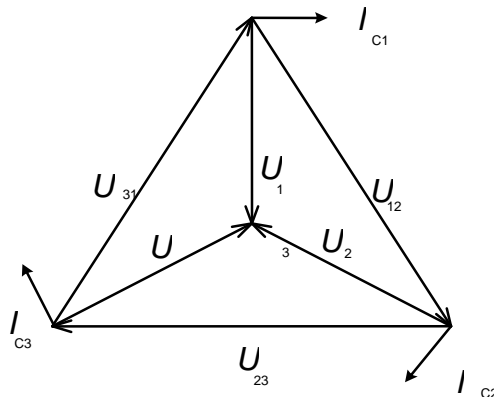
Pro výše uvedené předpoklady lze pro napětí a proudy psát:

$$\begin{aligned} U_{01} - U_{12} - U_{02} &= 0 & U_{01} - U_0 - U_1 &= 0 \\ U_{02} - U_{23} - U_{03} &= 0 & U_{02} - U_0 - U_2 &= 0 \\ U_{03} - U_{12} - U_{02} &= 0 & U_{03} - U_0 - U_3 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{r.2-1})$$

$$\begin{aligned} I_{f1} &= I_{C01} + I_{C12} - I_{C13} & I_{C01} &= j\omega C_{01} U_{01} \\ I_{f2} &= I_{C02} + I_{C23} - I_{C12} & I_{C02} &= j\omega C_{02} U_{02} \\ I_{f3} &= I_{C03} + I_{C31} - I_{C23} & I_{C03} &= j\omega C_{03} U_{03} \end{aligned} \quad \text{kde} \quad (\text{r.2-2})$$

$$\begin{aligned} U_{01} + U_{02} + U_{03} &= U_0 \\ I_{01} + I_{02} + I_{03} &= I_0 \end{aligned} \quad (\text{r.2-3})$$

Viz. [9]

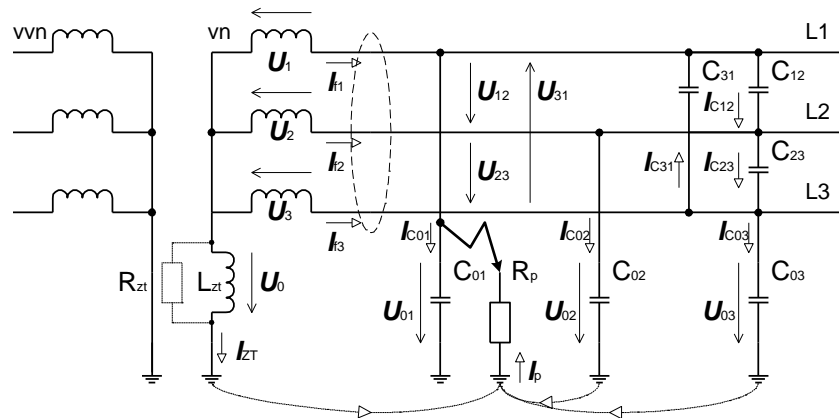


obr.2-2 Fázorový diagram sítě s izolovaným uzlem [9]

2.2 Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost

Většina sítí 22 kV je provozována s kompenzací kapacitních zemních proudů, proto se jim říká síť kompenzované. Tento způsob provozu se užívá jak ve venkovních, tak i v sítích kabelových. Princip spočívá v tom, že mezi uzlem napájecího transformátoru a zemí je zapojená proměnná indukčnost – zhášecí Petersenova tlumivka (zhášecí tlumivka), která je naladěná tak,

aby při vzniku zemního spojení protékal touto tlumivkou stejný jalový proud, jako kapacitní proud sítě, ale s opačným směrem. V místě zemního spojení dochází k vektorovému součtu těchto dvou proudů a k jeho proudovému odlehčení, které způsobí zhasnutí oblouku. Při absolutním vyladění zhášecí tlumivky bude protékat místem poruchy pouze zbytkový proud, který se skládá ze svodového proudu sítě, zkratového proudu zhášecí tlumivky a proudů vyšších harmonických. Kompenzací kapacitních zemních proudů se docílí, že místem zemního spojení protéká jen malý proud, takže nedochází k větším škodám. Kompenzovaný způsob provozu sítě, umožňuje provozovat vedení se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení místa zemního spojení, takže doba přerušení dodávky je velmi krátká [9].



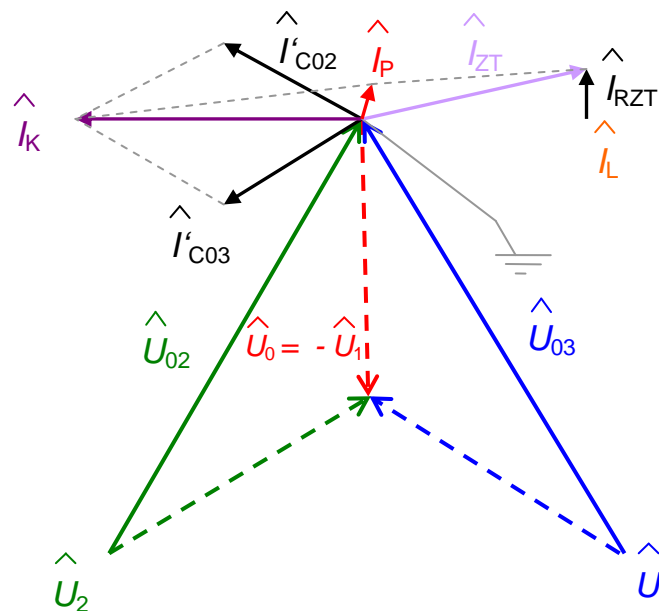
obr.2-3 Kompenzovaná síť [9]

K určení poměrů v kompenzované síti lze využít vztah (r.2-4). Budeme-li předpokládat určitou kapacitní nesymetrii C_{nes} a ztrátový odpor ve zhášecí tlumivce R_{ZT} (svodové odpory systému v jednotlivých fázích jsou pro jednoduchost zanedbány) lze napětí v uzlu ve stavu bez zemního spojení vyjádřit rovnicí (r.2-5). Této závislosti se využívá pro automatické naladění tlumivky do optimálního stavu, při kterém je napětí v uzlu maximální. Zhášecí tlumivkou tedy i v klidovém stavu protéká proud, který je daný hlavně kapacitní nesymetrií [9].

$$C_0 = C_{k0} \cdot l \quad (r.2-4)$$

$$I_p = 3 \omega C_{k0} l U_f = \sqrt{3} \omega C_{k0} l U_s$$

$$U_0 = U_f \frac{j \omega C_{nes}}{1/R_{ZT} + j(3\omega C_0 + \omega C_{nes} - 1/\omega L_{ZT})} \quad (r.2-5)$$



obr.2-4 Fázorový diagram napětí a proudu pro kompenzovanou síť pro $R_p \rightarrow 0$

2.3 Sítě VN s nepřímým uzemněním uzlem přes odpor

Sítě VN mohou být provozovány s uzlem spojeným přes činný odpor, kde je povolen maximální jednopólový zkratový proud u venkovních a smíšených sítí 300 A u kabelových sítí 1000 A. Spojení fáze se zemí je jednopólovým tlumeným zkratem. Vzhledem k velikosti vypínaných proudů spojení fáze se zemí je jednopólovým tlumeným zkratem. Vzhledem k velikosti vypínaných proudů musí následovat okamžité vypnutí chráněno úseku. Síť není možné provozovat se zemním spojením jako u kompenzovaných sítí. Odporové uzemnění uzlu transformátoru se používá na všech hladinách napětí kabelových VN sítí.

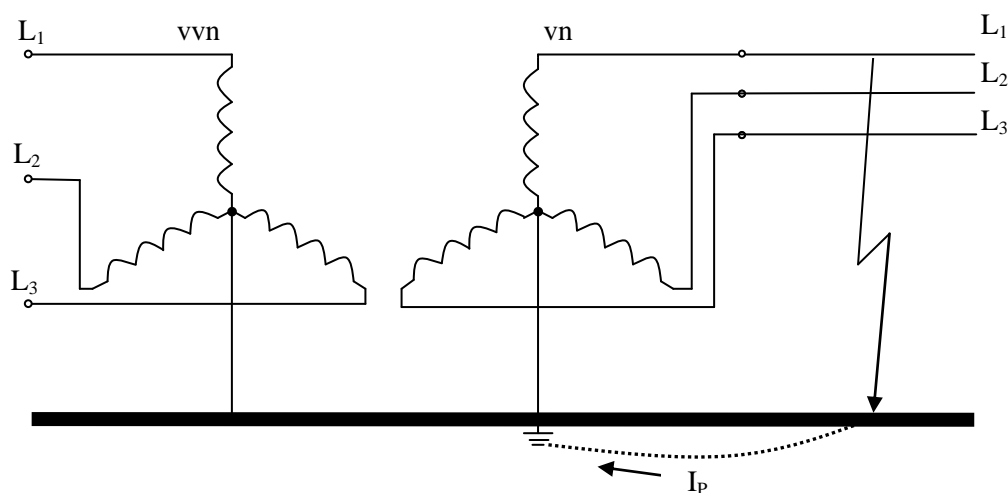
Při vzniku jednopólové poruchy „zkratu“ v síti poklesne napětí na postižené fázi (až na 0), zatímco na uzlu transformátoru se zvýší téměř na hodnotu fázového napětí. Místem poruchy při jednopólovém zkratu protéká vektorový součet proudů odporu a kapacitního proudu sítě. Jeho velikost je závislá na velikosti odporníku a rozsahu napájecí sítě. Odpor zapojený do uzlu transformátoru omezí velikost zkratového proudu, zmenší hodnotu dotykových napětí a působí příznivě na tlumení přepětových jevů. To má za následek snížení následných poruch, neboť sítě jsou vypínány již při jednopólové zemní poruše, tím dochází k snížení namáhání izolace

zařízení VN. Poruchovost u sítí s uzlem uzemněným přes činný odpor je několikanásobně menší než u sítí provozovaných pře zhášecí tlumivku.

U těchto sítí nedochází k vícenásobným nebo přerušovaným poruchám. Zmenší se počet mezifázových zkratů, poněvadž nedojde k propálení izolace kabelu. Nevýhodou uzemněného uzlu přes činný odpor v distribuční soustavě je okamžité vypnutí chráněného úseku [8].

2.4 Soustava s přímo uzemněným uzlem

Soustavy s přímo uzemněným uzlem se používají převážně v vn a vvn sítích a jejich cílem je ochrana před nebezpečným dotykovým napětím neživých částí. Zemní spojení se pak v přímo uzemněných sítích nazývá zkratem. Popis těchto sítí je zde uveden z důvodu úplného přehledu možných zapojení uzlu transformátoru, a že některé ochrany pracují z části na principu „ochrany nulování“, kromě zapojení přes Bauchův transformátor. Na obr. 2-5 je zobrazená síť s přímo uzemněným uzlem a tok poruchového proudu při jednofázovém zemním spojení.



obr. 2-5 Síť s přímo uzemněným uzlem [6]

Poruchový proud při jednofázovém zkratu v soustavách s přímo uzemněným uzlem transformátoru musí být vypočítán jako jednofázový zkrat. Metodiky výpočtu jsou předmětem norem a dalších nařízení. Nutnost výpočtu jednofázového zkratu spočívá kromě proudových a dynamických účinků zkratových proudů hlavně ve zjištění parametrů pro zajištění spolehlivé funkce ochrany proti nebezpečnému dotykovému napětí neživých částí elektrického zařízení.[6]

3 PRINCIP PŮSOBENÍ PROTI BLOUKOVÉ OCHRANY

3.1 Základní členy ochrany

Ochrany bývají vybaveny těmito základními členy:

- Vstupní člen
- Popudový člen
- Měřicí člen
- Logika ochrany
- Časový člen
- Koncový člen
- Napájecí člen

Vstupní člen – převádí vstupní veličinu, což může být například proud nebo napětí na vhodný tvar, který je dále zpracováván. Jmenovité vstupy ochrany bývají u napětí 100V, u proudů 1A nebo 5A. K zajištění jmenovitých vstupů slouží jistící transformátory proudu a napětí. Tyto vstupy se převádějí na ještě menší hodnoty pomocí děličů, bočníků a oddělovacích transformátorů.

Popudový člen - podává informaci o vzniku poruchy měřicímu členu a logice ochrany. Tyto členy pak vyhodnotí, zda porucha spadá do kompetence ochrany. Popudový člen, který se může funkčně i konstrukčně lišit od měřicího členu, zajišťuje rozběhnutí těchto obvodů. Popudový člen by měl mít větší citlivost než měřicí člen.

Logika – zpracovává signál z popudu za účelem určení funkce měřicího členu a určení funkce koncového členu. Tím se rozumí např. to, zda se má signalizovat náběh ochrany, anebo se má vyslat impuls k vypínači. Logika používá ke své funkci známé logické členy jako součet, součin, negace.

Měřicí člen – určuje vlastnost ochrany jako je selektivita, naříditelnost, přesnost, citlivost.

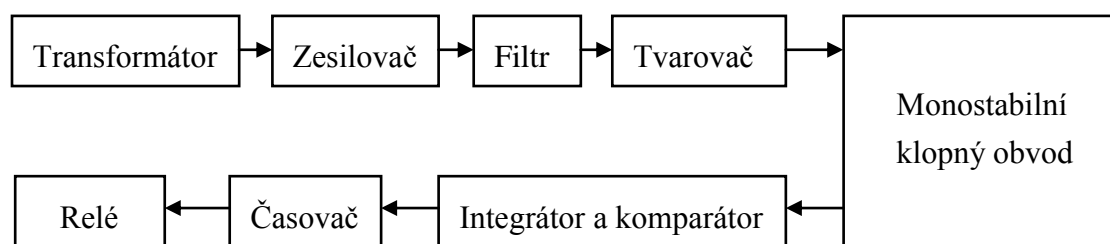
Časový člen – prodlužuje dobu působení ochrany na základě pokynu z logiky. Systém tohoto prodloužení zajišťuje selektivní působení ochran, umožňuje dovolit po určitou dobu dovolené přetížení chráněného objektu a snižuje pravděpodobnost falešné reakce.

Koncový člen – je tvořen pomocnými relé a výkonovými kontakty. Na jejich vstup přichází signál z logiky a výstupní signál působí na signalizaci anebo vypínací cívku vypínače.

Napájecí členy – zajišťují funkci ochrany. Může být z baterie, střídavé sítě, nebo může být napájení zajištěno z přístrojových transformátorů napětí nebo proudu [1].

3.2 Protioblouková ochrana PO1

Protioblouková ochrana PO1 byla zkonstruována z důvodu identifikace vysokoohmového oblouku, popř. zkratového. Ochrana pracuje na principu měření a vyhodnocování nestacionarit v sinusovém průběhu napětí, vyvolaných hořením elektrického oblouku. Princip funkce vyplývá z blokového schématu na obr. 3-1.



obr. 3-1 Blokové schéma protiobloukové ochrany PO1 [15]

Vstupní transformátor slouží ke galvanickému oddělení obvodů, dále se vstupní signál upraví zesilovačem. Filtr typu horní propust reaguje na napěťové mikropoklesy tak, že se rozkmitá tlumenými kmity. Jejich velikost závisí na amplitudě a strmosti mikropoklesů. Pokud amplituda kmitů za filtrem dosáhne předem nastavené úrovně, je tvarovačem generován pulz, který spouští monostabilní klopný obvod. Tento generuje pulzy, které nabíjí integrační článek. Po dosažení zvolené úrovně napětí na integrátoru dojde k překlopení komparátoru, který uvede do činnosti časový článek s nastavitelnou dobou zpoždění. Po uplynutí této doby dojde k vybavení relé, ovládajícího vypínače.

Pokud během chodu časového članku dojde k uhasnutí oblouku, potom klesá napětí na integračním članku. Při jeho poklesu pod stanovenou úroveň dojde k vyblokování časového članku. Ochrana pracuje v logice 2+1 pulz, což znamená, že je potřeba přivést do integrátoru 2 pulzy, aby se komparátor uvedl do chodu. Zbývající pulz je nutno generovat v takovém čase, aby nedošlo k vyblokování časového članku [1].

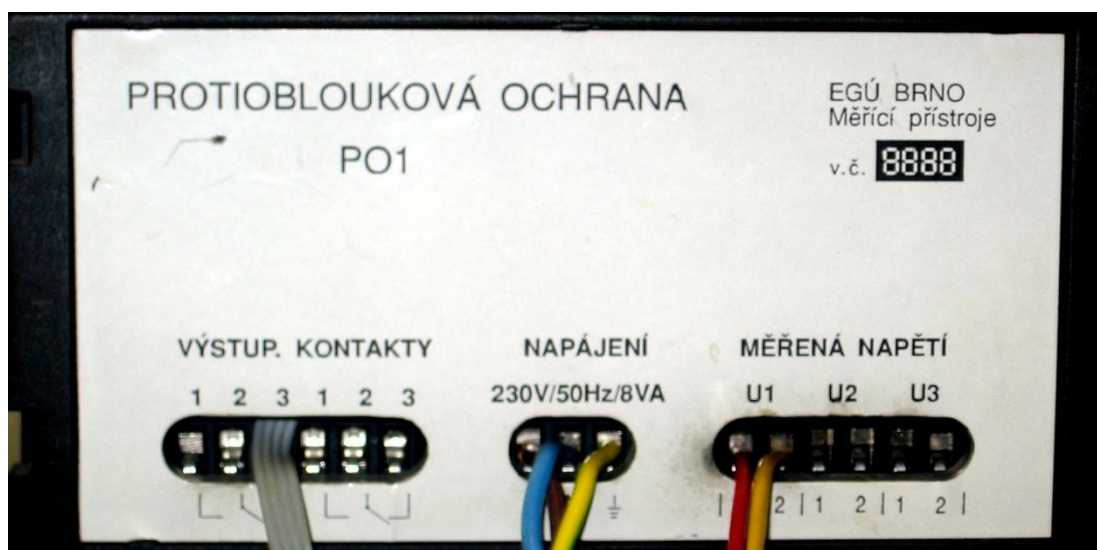
3.2.1 Ovládání a nastavení PO1

Zesílení zesilovače lze měnit v rozsahu $0,2 \div 1$ s krokem 0,2, přičemž na pátém stupni je ochrana nejcitlivější. Ochrana disponuje pěti časovými stupni, nastavitelnými v rozmezí $100 \div 500$ ms a krokem 100 ms.

Pro připojení ochrany k chráněnému objektu slouží vývody, které se připojí k jednotlivým fázím rozváděče, tak aby byly chráněny před rušením. Napájení ochrany je střídavým napětím 230 V, 50 Hz. Měřicí a napájecí vývody jsou umístěny v zadní části ochrany. Reakce komparátoru je signalizována pomocí zelené LED diody pro každou fázi. Vypnutí je signalizováno pomocí červené LED diody v každé fázi. Pro obnovení funkce ochrany slouží tlačítko RESET. Dále je na čelním panelu ještě umístěno tlačítko síťového napájení s kontrolní zelenou LED diodou, svorka pro připojení měřicí země a v každé fázi je umístěna modrá svorka, na kterou je přiveden kontrolní signál filtru [14].



obr. 3-2 Čelní panel PO1 [14]



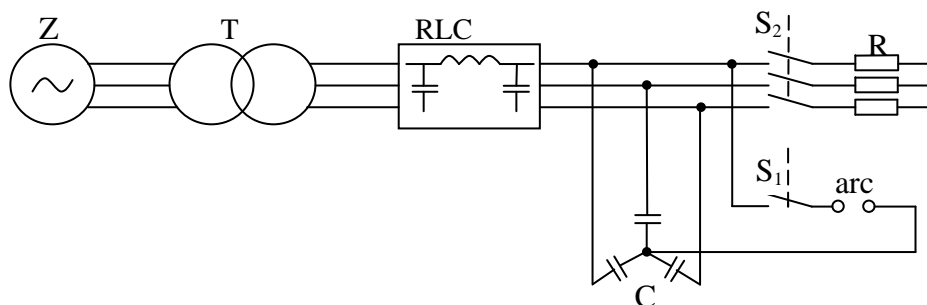
obr. 3-3 Zadní panel PO1 [14]

4 NÁVRH TESTOVACÍHO PRACOVISTĚ PRO OVĚŘENÍ PROTI OBLOUKOVÉ OCHRANY

V praktické části své diplomové práce jsem simuloval obloukovou zemní poruchu na fyzikálním modelu elektrické sítě. Měření bylo provedeno na obloukovém jiskřišti s podporou vysokorychlostní kamery, díky které byly pořizovány záběry elektrického oblouku. Celé měření proběhlo za přítomnosti a ve spolupráci pracovníka vědy a výzkumu PhD. Ing. Stanislava Mišáka v laboratoři HARD VŠB-TUO katedry elektroenergetiky.

4.1 Popis fyzikálního modelu

Jedná se o fyzikální model napájený z 3f sítě nízkého napětí přes regulační transformátor jak je znázorněno na obr.4-1.



obr.4-1 Schéma silové části fyzikálního modelu [7]

Síť nízkého napětí s regulačním transformátorem nám představuje pro účely matematické simulace tvrdý napěťový zdroj Z , který napájí výkonový transformátor T s parametry:

$$S_n = 15 \text{ kVA}$$

$$U_n = 380 \text{ V}$$

$$P = 1$$

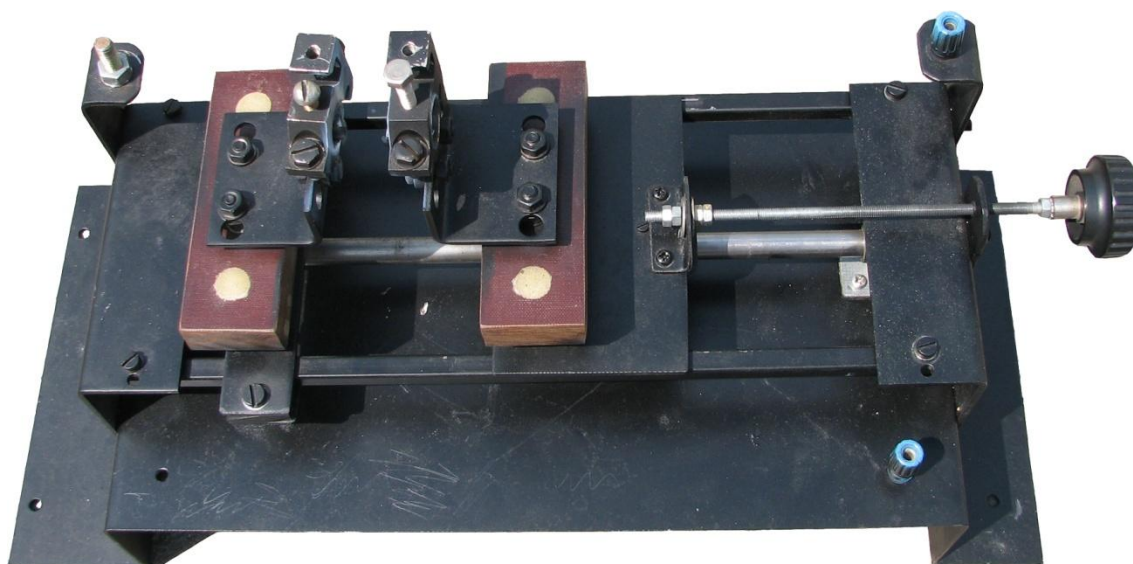
RLC obvod představuje model sítě ze kterého jsme zapojili jen indukčnost v sérii s odporem.

Výsledná reaktance sítě:

$$X = (1,101 + j3,3) \Omega$$

Kapacitu sítě proti zemi představuje kondenzátorová baterie **C** zapojená do trojúhelníku o kapacitě: $C = 25,5 \mu\text{F}$

Mezi uzlem kondenzátorové baterie **C** a jednu fází je přes silový kontakt stykače **S1** připojeno obloukové jiskřiště **arc** vyfocené na obr. 4-2. Odporník **R** je připojený přes silové kontakty stykače **S2** k jednotlivým fázím sítě z důvodů zkratování a vybití kondenzátorové baterie po odměření a odpojení napětí zdroje od sítě.

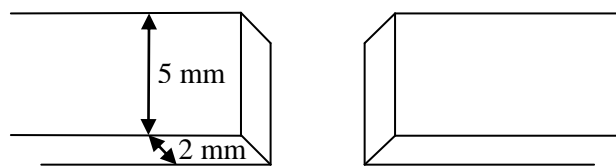


obr.4-2 obloukové jiskřiště [7]

Obloukové jiskřiště je vyrobeno tak, aby umožňovalo bezpečné měření elektrického oblouku bez nebezpečí přeskočení oblouku na kostru. Elektrická část je proto izolovaná od kostry a mechanismu zajišťujícímu plynulou (ruční) změnu vzdálenosti mezi elektrodami. Elektrody jsou k jiskřišti přichyceny pomocí držáků, které jsou dále spojeny s elektrickým obvodem fyzikálního modelu. Levý držák elektrod je pevně přichycen, zatímco pravý je přes závitovou tyč přichycen ke kostře jiskřiště. Jednoduchým otáčením závitové tyče je pak možno docílit plynulého oddálení, nebo přiblížení pravého držáku elektrod k levému, což ve výsledku znamená plynulou regulaci délky elektrického oblouku. Celé jiskřiště je natřeno matnou černou barvou z důvodu omezení světelných odlesků a tím ke zhoršení kvality záznamu obrazu přes vysokorychlostní kameru.

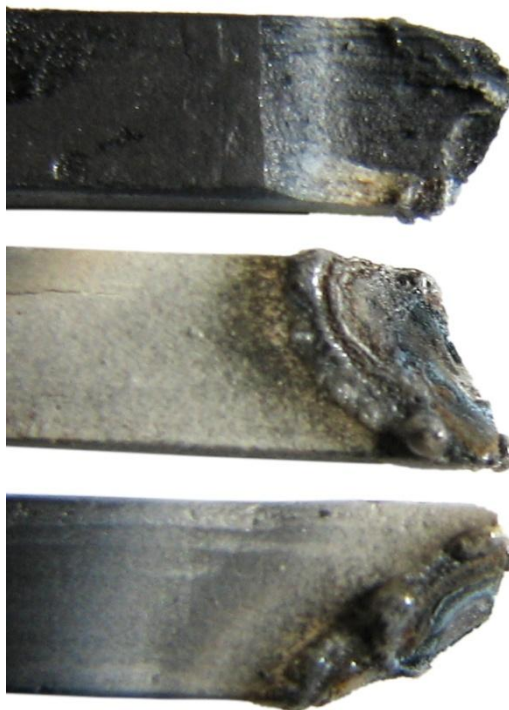
Elektrody, které byly převážně využívány při měřeních, jsou vyrobeny z uhlíku.

Rozměry elektrod jsou na obr. 4-3.



obr. 4-3 Rozměry elektrod [7]

Uhlík byl využit z důvodu stability hoření elektrického oblouku. Elektrický oblouk u kovových elektrod uhasínal již při malých vzdálenostech mezi elektrodami, zatímco s uhlíkovými elektrodami při napájecím napětí 400V dokázal oblouk ještě stabilně hořet při vzdálenosti 35 mm mezi elektrodami. Na obr. 4-4 je vidět opotřebení elektrod po uhasnutí oblouku [7].



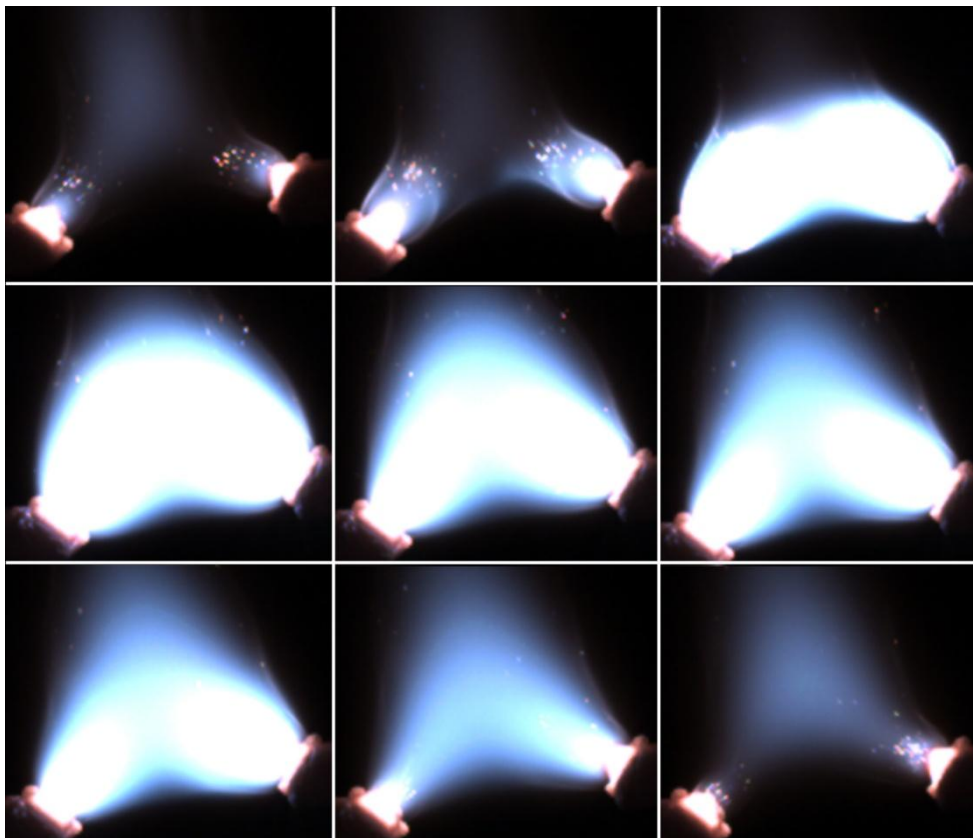
obr.4-4 Opotřebení elektrod [7]



obr.4-5 Vysokorychlostní kamera [13]

K pořízení snímků elektrického oblouku posloužila vysokorychlostní kamera MotionPro X3. Tato kamera je vhodná pro použití jak v průmyslových, tak i ve vědeckých aplikacích s technologií double-exposure mode, která umožňuje snímat okolí v intervalu 100 ns. Je vybavena pamětí o kapacitě 4GB, která omezuje délku záběru, respektive počet uložených snímků. Kamera si tedy nejprve uloží jednotlivé snímky do paměti a následně je možné s nimi dále pracovat v přibaleném programu MotionProX. Je možno zvolit jen konkrétní snímky, určit krok s jakým se bude ukládat, pracovat s grafickými filtry, měnit velikost a typ souboru v jakém se budou dané snímky ukládat na počítač. Poté jsou snímky přeneseny pomocí ethernetu (USB 2.0) 1000 Mbps do počítače a mohou být dále vyhodnocovány. Další možností jsou výstupy a vstupy pro trigrování kamery, ať už vnějšího pomocí signálu, nebo případ, kdy kamera vygeneruje signál pro spuštění externích přístrojů. Je tedy možné kameru trigrovat ručně přes počítač a již zmíněný program MotionProX, nebo pomocí signálu vygenerovaného např. osciloskopem, popřípadě další měřicí přístroje spouštět signálem, který generuje kamera.

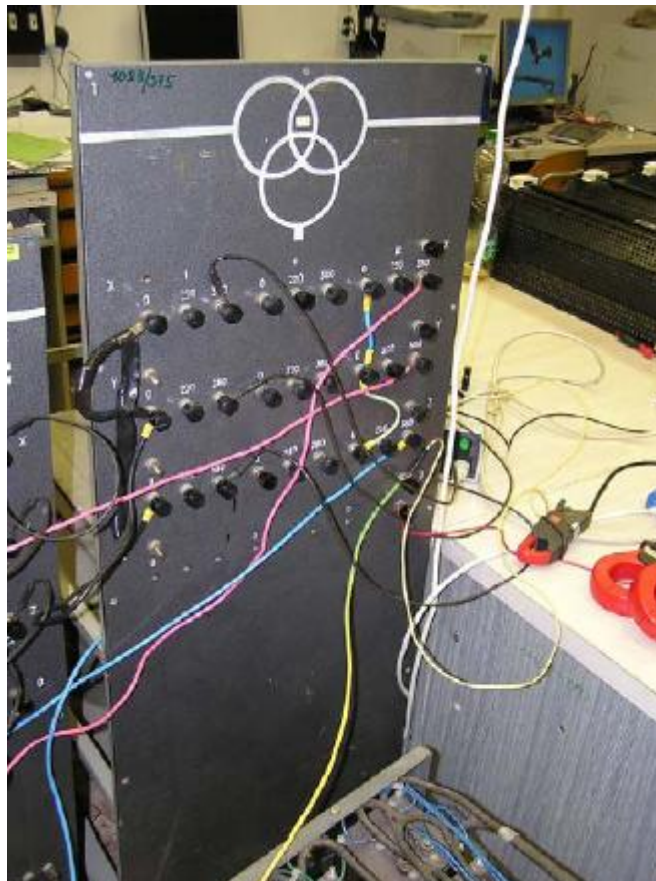
Objektiv byl použit Nikon s pevným ohniskem 35mm a F 1,4 zoom s možností nastavit clonou stínění, kvůli velké intenzitě vyzařování elektrického oblouku. Pomocí tohoto vybavení již není problém snímat elektrický oblouk a využít těchto snímků ať k vědeckým, nebo studijním účelům. Na obr. 4-6 jsou vidět snímky pořízené v průběhu jedné půlperiody oblouku s délkou mezi elektrodami 10,5 mm [7].



obr.4-6 Snímky jedné půl-periody elektrického oblouku [7]

4.2 Výkonový transformátor

Pro napájení fyzikálního modelu sítě byl použit výkonový transformátor viz obr.4-7, který je součástí vybavení laboratoře HARD VŠB-TUO katedry elektroenergetiky.



obr.4-7 Výkonový transformátor [15]

Parametry transformátoru:

$S_n=15 \text{ kVA}$, $U_n=380 \text{ V}$, $p=1$

$\Delta P_k=600 \text{ kW}$, $u_k=15\%$,

$\Delta P_0=71,3 \text{ kW}$, $i_0=0,94\%$

Náhradní impedance transformátoru:

Sousledná složka

$$Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} (\Omega) \quad (\text{r.4-1})$$

$$Z_{(1)} = \frac{15 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,015} = 1,6 \, \Omega$$

Zpětná složka

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \, (\Omega) \quad (\text{r.4-2})$$

Kde

U_k jmenovité napětí nakrátko

U_{nT} jmenovité napětí transformátoru

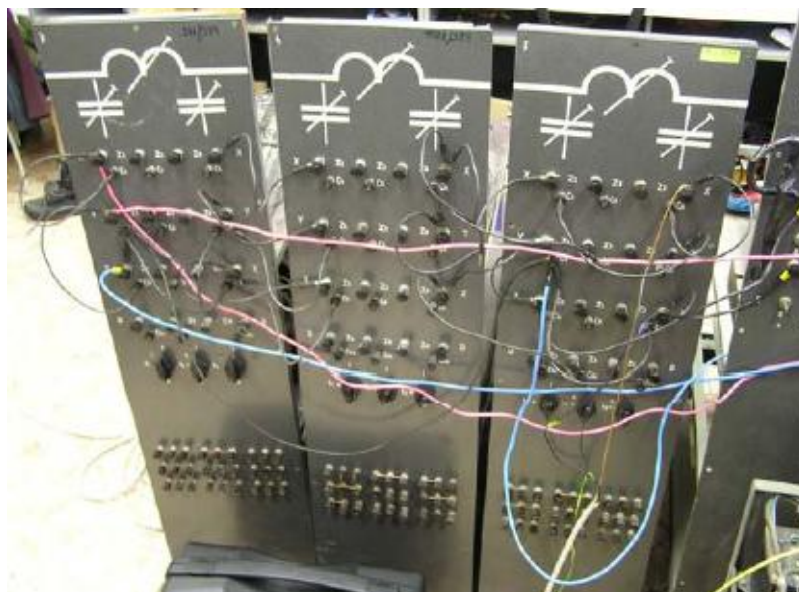
S_{nT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

Nulová složka

$$x_{(0)} = 0,85x_{(1)} = 1,36 \, \Omega$$

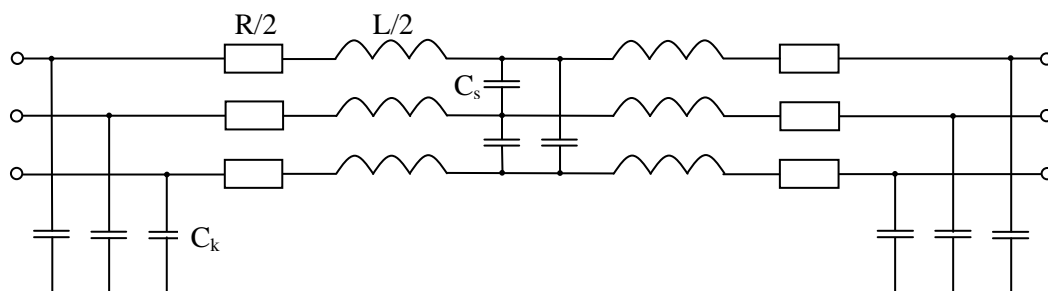
4.3 Fyzikální model sítě

Jako fyzikální model sítě byla použita simulace venkovního vedení, viz obr.4-8



obr.4-8 Model venkovního vedení [15]

Náhradní schéma venkovního vedení



obr.4-9 Náhradní schéma venkovního vedení

Parametry π článku:

$$Z = 0,762 + j3,303 \, \Omega$$

$$C_k = 1,5 \, \mu\text{F}$$

$$C_s = 0,53 \, \mu\text{F}$$

Kde

Z podélná impedance

C_k kapacita proti zemi

C_s mezifázová kapacita

4.4 Výpočet parametrů soustavy pro simulaci reálné VN sítě

Soustava pro simulaci sítě bude napájena napětím $U_n = 380 \, \text{V}$ a pro následující výpočty budeme vycházet z kapacity kondenzátorové baterie zapojené do trojúhelníka o hodnotě $C = 25,5 \, \mu\text{F}$. Tato hodnota představuje v našem případě kapacitu soustavy.

Kapacitní proud soustavy

$$I_C = 3 \cdot U \cdot \omega \cdot C = 3 \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 2\pi f \cdot 25,5 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 6,28 \cdot 50 \cdot 25,5 \cdot 10^{-6} = 5,27 \, \text{A} \quad (\text{r.4-3})$$

Návrh kompenzační tlumivky

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot 25,5 \cdot 10^{-6}} = 0,3977 \text{ H} \quad (\text{r.4-4})$$

Velikost uzlového odporníku

$$R \leq \frac{1}{3j\omega \cdot C} = \frac{U_f}{I_c}$$
$$R \leq \frac{1}{3j\omega \cdot C} = \frac{1}{3j\omega \cdot 25,5 \cdot 10^{-6}} = 41,63 \Omega \quad (\text{r.4-5})$$

4.5 Nároky na protiobloukovou ochranu na hladině VN

Všechny námi provedené experimenty byly provozovány na hladině nízkého napětí. Aby mohla protioblouková ochrana působit oproti námi provedenému experimentu i na hladině vysokého napětí, (což je pro praktické využití žádoucí z hlediska zmenšení škod způsobených elektrickým obloukem na zařízeních VN) musí členy této ochrany splňovat určité požadavky.

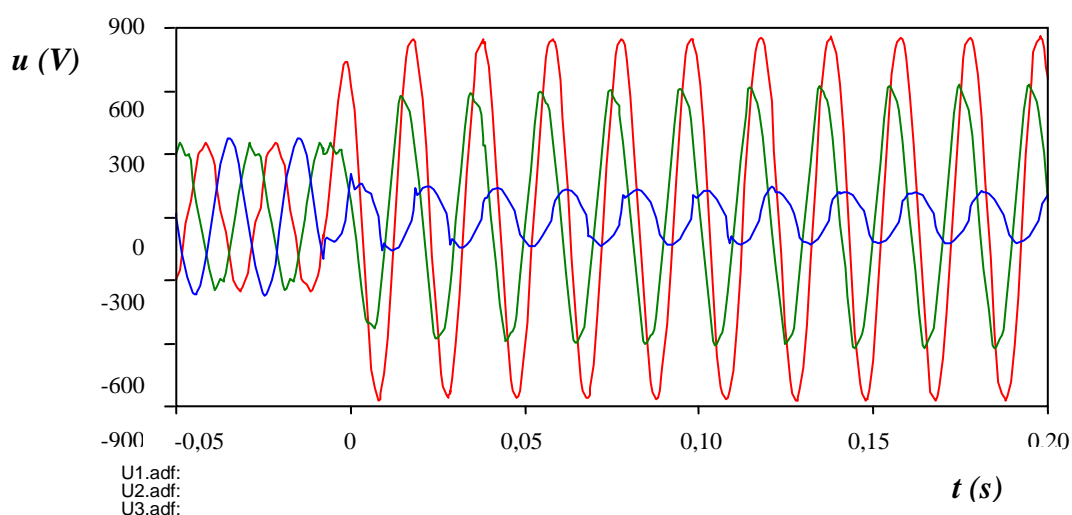
Základní požadavek pro měření rychlých přechodných dějů, které zde vznikají je správná volba snímače napětí. Použitý měřicí transformátor napětí musí dokázat přenést signál s požadovanou přesností a bez zkreslení o hodnotách až stovek kHz. Jako nejvhodnější se jeví použití kapacitně odporového děliče, kdy kondenzátory připojené paralelně k rezistorům posunou mezní hodnotu děliče do řádů několika stovek kHz. Frekvenční charakteristika děliče má velmi důležitou vypovídající hodnotu pro získání co možná nejvíce nezkresleného a přesného signálu. V praxi je proto třeba znát frekvenční přenos celého řetězce měřeného signálu, aby bylo možné ve členech ochrany provést případnou korekci zaznamenaných průběhů a nedocházelo tak ke zkreslování těchto měřených průběhů. Důležitým vstupním předpokladem je samozřejmě znalost typů přepětí v energetické síti, což nám umožňuje stanovit frekvenční požadavky na použitý dělič napětí.

5 OVĚŘENÍ FUNKCE PROTILOUKOVÉ OCHRANY NA FYZIKÁLNÍM MODELU REÁLNÉ VN SÍTĚ

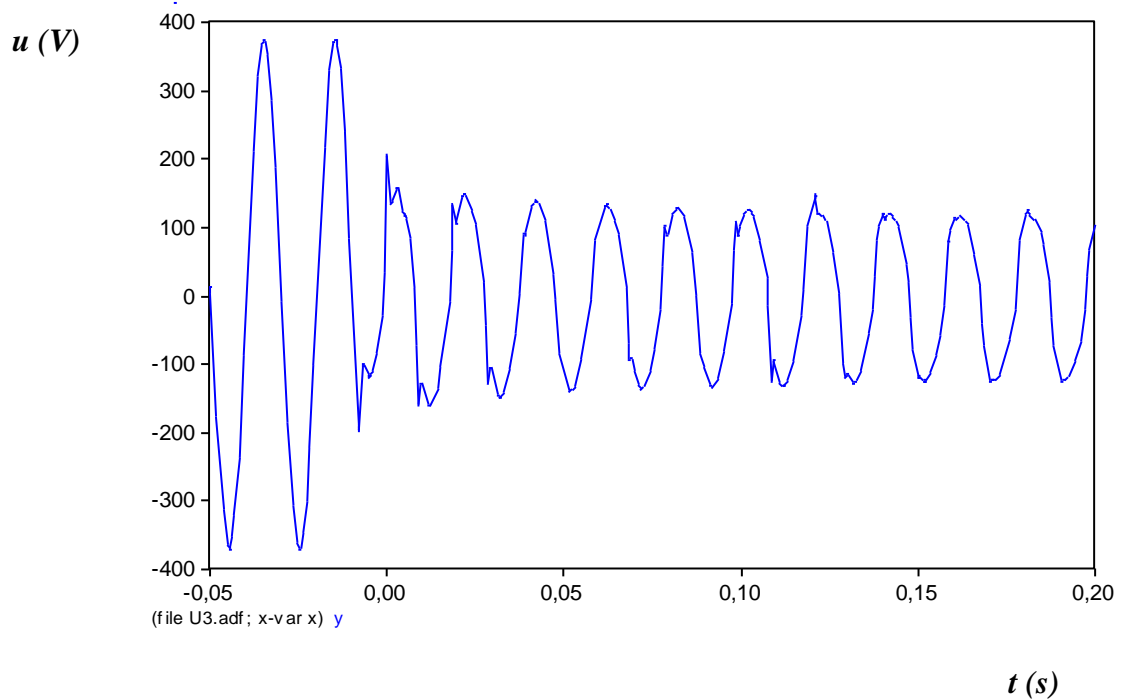
Při ověřování správné funkce protiobloukové ochrany PO1 jsme v laboratoři HARD VŠB-TUO katedry elektroenergetiky zkoumali činnost elektrického oblouku při nízkoohmovém a vysokoohmovém zemním spojení. Ochrana PO1 je zkonstruována tak, aby reagovala na nestacionaritu napětí ve fázi postižené elektrickým obloukem. Z důvodu dobrého vykreslení těchto nestacionarit, čili mikropoklesů napětí, byly při měření použity uhlíkové elektrody. Dále jsme zkoumali průběhy okamžitých hodnot obloukového napětí a proudu a průběh obloukového napětí v závislosti na délce obloukového výboje. Součástí experimentu bylo také zkoumání stability hoření elektrického oblouku v závislosti na vzdálenosti elektrod. Pro větší obraznost nám k zachycení obrazového záznamu posloužila vysokorychlostní kamera MotionPro X3.

5.1 Nízkoohmové zemní spojení

Při tomto měření jsme simulovali nízkoohmové zemní spojení ve fázi U3 a postupným přepínáním na pětistupňovém přepínači U3, tak vyhodnocovali okamžik, ve kterém ochrana zareaguje a obvod přeruší. Ochrana zareagovala na stupni citlivosti číslo 3. Průběh napětí všech tří sledovaných fází je vyobrazen na obr. 5-1. Průběh nestacionarity ve fázi U3 na který ochrana reaguje je pak dobře patrný na obr. 5-2.



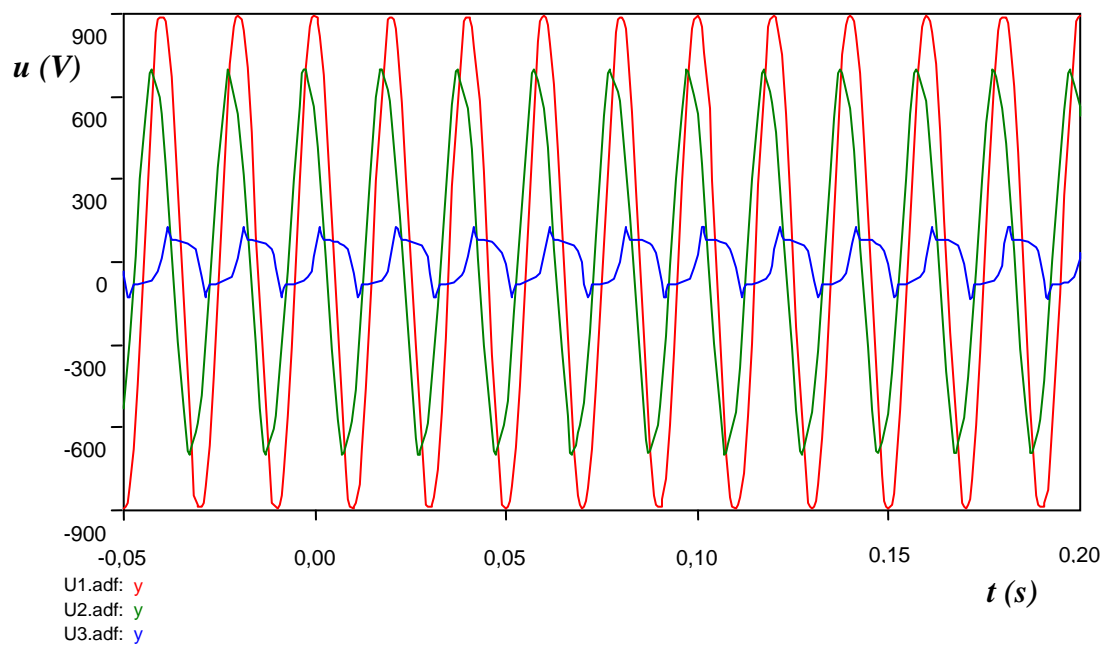
obr.5-1 Průběhy napětí všech 3 fází



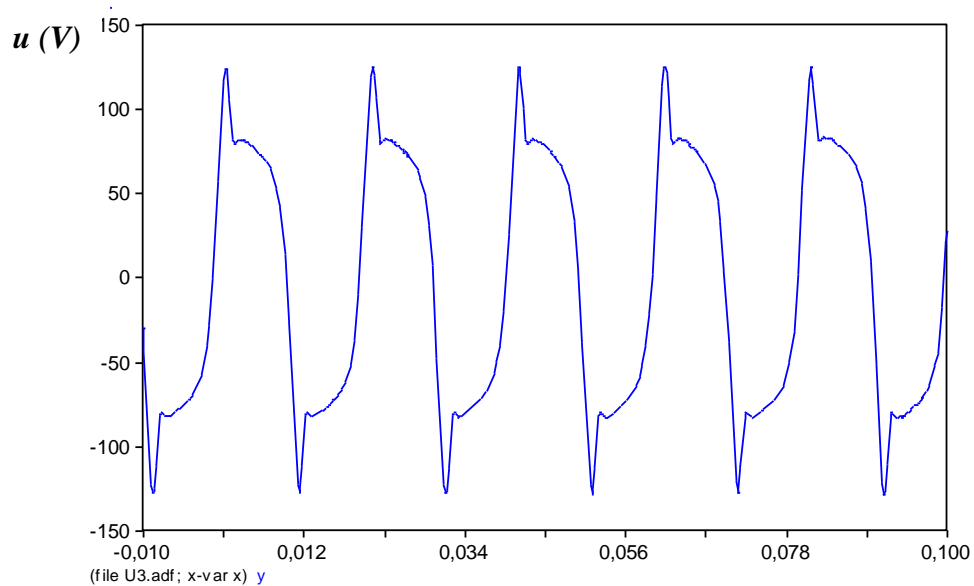
obr.5-2 Průběh napětí - fáze 3

5.2 Vysokoohmové zemní spojení

Při tomto měření jsme simulovali vysokoohmové zemní spojení ve fázi U_3 a postupným přepínáním pětistupňového přepínače U_3 vyhodnocovali okamžik, ve kterém ochrana zareaguje a obvod přeruší. Při roztahování oblouku, čímž se zvyšoval odpor oblouku, ochrana zareagovala při vzdálenosti elektrod 2,5 cm na stupni citlivosti číslo 3. Při dalším oddálení elektrod na délku 3,5 cm, pak ochrana reagovala opět na stupni citlivosti číslo 3 a při vzdálenosti elektrod 4,5 cm, pak ochrana vybavila na stupni citlivosti číslo 4. Průběh nestacionarit ve fázi U_3 u tohoto měření je patrný na obr. 5-4 a průběh napětí všech tří sledovaných fází, je pak vyobrazen na obr. 5-3[14].



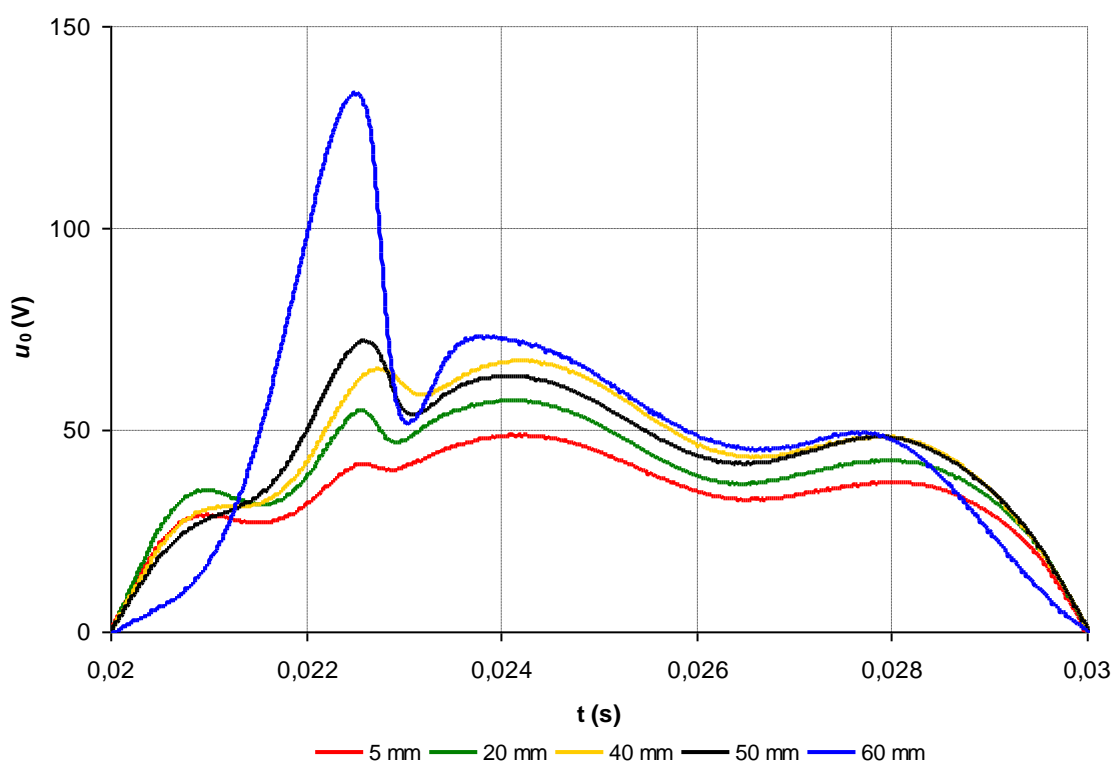
obr.5-3 Průběhy napětí všech 3 fází



obr.5-4 Průběh napětí fáze 3

5.3 Parametry elektrického oblouku

Jelikož v praxi dochází nejčastěji ke vzniku jednopólových zemních poruch, v další části našeho experimentu jsme se zabývali zkoumáním parametrů elektrického oblouku v závislosti na změně vzdálenosti elektrod. Díky oddalování elektrod, mezi nimiž hoří elektrický oblouk, dochází ke změně rezistence, což mělo simulovat jednopólovou zemní poruchu tedy poruchu s nikoli konstantní, ale časově proměnlivou změnou rezistence poruchy. Posouzení vlivu obloukové zemní poruchy na elektrizační soustavu, v níž tento typ poruchy vznikl, je velmi obtížné. Je to dáno samotnou podstatou elektrického oblouku, jelikož se jedná o prvek s dynamickou a stochastickou charakteristikou. Obloukové zemní spojení bylo simulováno v soustavě s izolovaným uzlem ($\hat{Z}_N \rightarrow \infty$), která byla napájena z výkonového transformátoru.



obr.5-5 Průběh obloukového napětí v závislosti na délce oblouku [5]

Na grafu jsou zobrazeny průběhy okamžitých hodnot obloukového napětí pro různou délku obloukového výboje. Jak je z grafu patrné, v případě kdy je délka obloukového výboje rovna

60 mm, docházíme do stádia limitní délky s dominantní zapalovací špičkou. Tuto hranici můžeme nazývat mez stability hoření elektrického oblouku a po překročení této délky se stává oblouk nestabilní a může dojít k jeho uhasnutí mezi elektrodami.

Z těchto okamžitých hodnot obloukového napětí lze pomocí matematického vztahu určit efektivní hodnotu obloukového napětí. Použitý vzorec pro výpočet efektivní hodnoty je:

$$U_{0_{ef}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |u_0(t)| \cdot dt \quad (r.5-1)$$

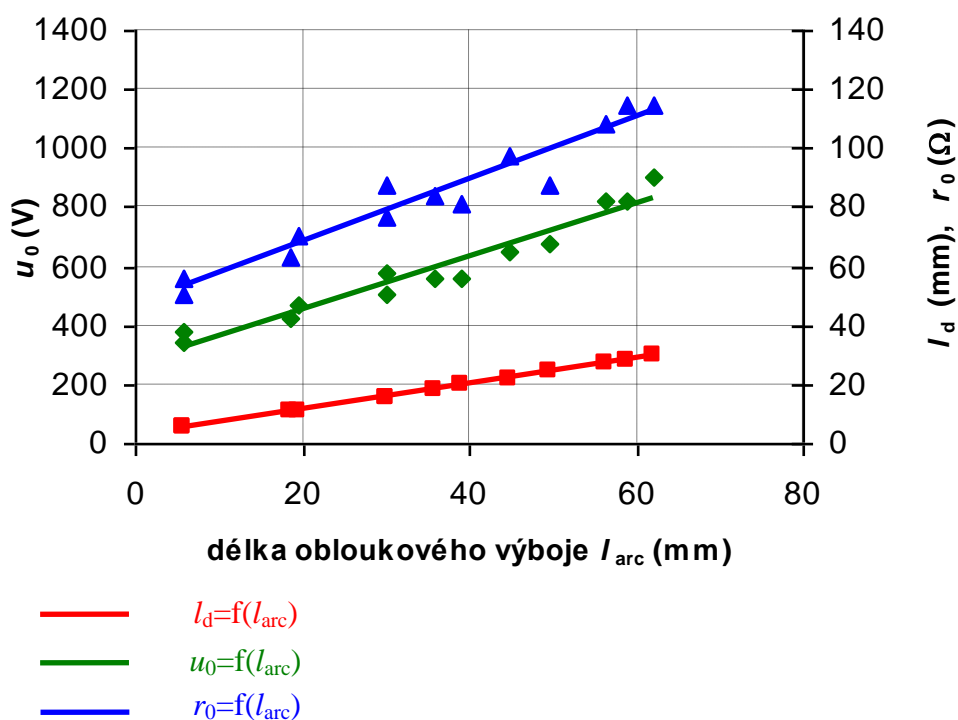
Jestliže budeme respektovat ustálené hodnoty proudu obloukovým výbojem, můžeme na tomto základě určit výslednou závislost $u_0 = f(l_{arc})$ a $r_0 = f(l_{arc})$ [5].

Kde:

l_{arc} je délka elektrického oblouku, hořícího mezi elektrodami

u_0 je obloukové napětí

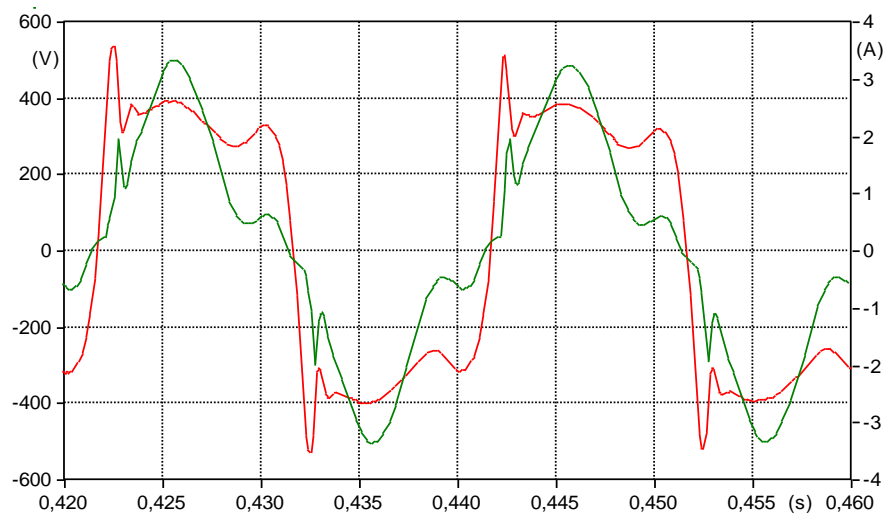
r_0 je rezistence elektrického oblouku při dané délce elektrického výboje



obr.5-6 Závislosti parametrů obloukového výboje [5]

Graficky znázorněné průběhy na obr.5-6, jasně ukazují závislost parametrů elektrického

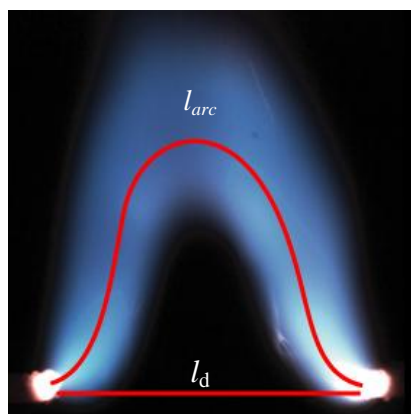
oblouku na jeho délce a tudíž i na vzdálenosti elektrod, mezi kterými elektrický oblouk hoří.



obr.5-7 Průběh okamžitých hodnot obloukového napětí a proudu

Graf na obr.5-7 nám ukazuje časový průběh obloukového napětí a proudu obloukem pro délku dráhy elektrického oblouku 10,5 mm.

Pro lepší přehlednost je zde uveden rovněž obrázek zachycený pomocí vysokorychlostní kamery, na němž je pro vysvětlení proložena křivka délky oblouku l_{arc} a přímka l_d , určující vzdálenost elektrod, mezi nimiž elektrický oblouk hoří.



obr.5-8 Obloukový výboj mezi elektrodami [5]

5.4 Stabilita hoření elektrického oblouku

V této části měření jsme zkoumali stabilitu hoření elektrického oblouku mezi elektrodami, kde na základě experimentálních měření v laboratorních podmínkách, byla pro stabilní hoření elektrického oblouku stanovena délka svodové dráhy, neboli vzdálenost elektrod, $l_d = 10$ mm, čemuž odpovídá délka obloukového výboje cca $l_{arc} = 17$ mm, což jsme určili prostřednictvím rovnice r. 5-2. Tato rovnice byla stanovena experimentálním měřením.

$$l_{arc} = 2,3l_d - 5,8 \quad (\text{mm}) \quad (\text{r.5-2})$$

Při respektování ustálené hodnoty proudu obloukovým výbojem pak můžeme rovněž určit požadovanou závislost $u_0 = f(l_{arc})$ a $r_0 = f(l_{arc})$ podle rovnic r.5-3 a r.5-4. Z těchto rovnic pak určíme výslednou závislost obloukového napětí u_0 a rezistence r_0 elektrického oblouku při dané délce elektrického výboje. V našem případě $l_{arc} = 17$ mm.

$$u_0 = 9l_{arc} + 276 \quad (\text{V, mm}) \quad (\text{r.5-3})$$

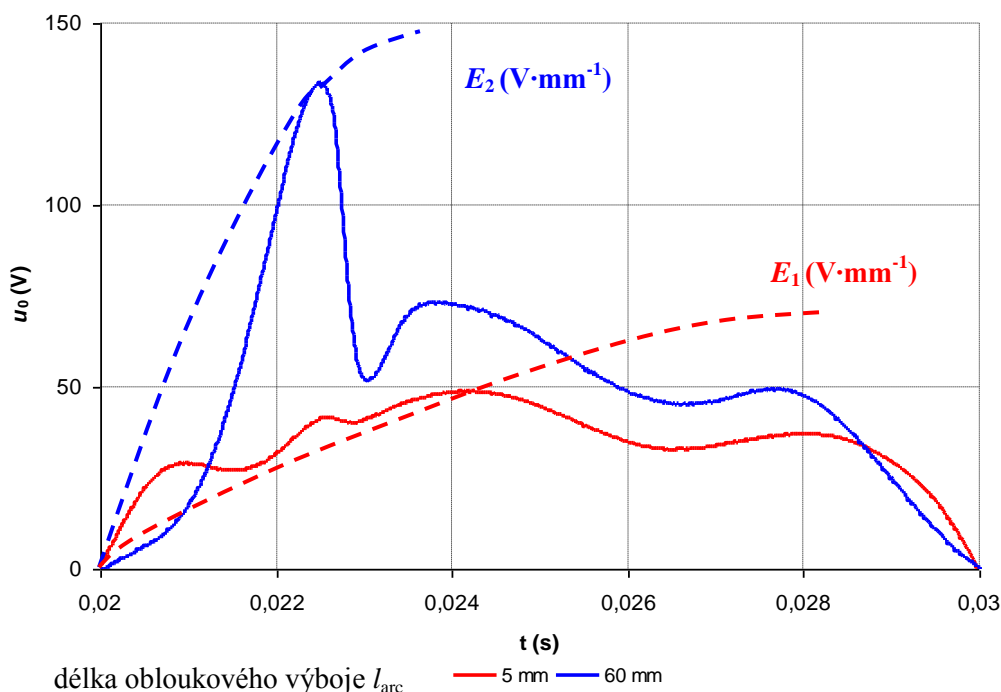
$$r_0 = 1,1l_{arc} + 47 \quad (\Omega, \text{mm}) \quad (\text{r.5-4})$$

Pomocí výše zmíněných výsledných rovnic jsme pak zjistili pro délku obloukového výboje $l_{arc} = 17$ mm, hodnoty obloukového napětí $u_0 = 429$ V a rezistence elektrického oblouku $r_0 = 66 \Omega$.

Jelikož mluvíme o stabilním hoření elektrického oblouku, napětí fáze s poruchou poklesne na hodnotu, kde odpor poruchy R_p odpovídá okamžité hodnotě odporu obloukového výboje. Jedná se tedy o stav hoření elektrického oblouku s majoritní převahou ionizačních procesů nad procesy rekombinačními v oblasti prostoru obloukového výboje [5].

5.5 Mez stability elektrického oblouku

Na následujícím obrázku vidíme průběh obloukového napětí v oblasti výbojové dráhy elektrického oblouku pro stabilní hoření a mez stability hoření elektrického oblouku mezi elektrodami.



obr.5-9 Průběh obloukového napětí pro stabilní hoření a mez stability [5]

E_1 – stabilní hoření, E_2 – mez stability hoření

Z průběhů zobrazených v obr.5-9 můžeme vidět, že elektrická pevnost ionizovaného prostoru obloukového výboje narůstá dle křivky E_1 , dochází k následnému elektrickému průrazu a opětovnému zapálení oblouku.

Jako další byl analyzován limitní stav elektrického oblouku v oblasti VA charakteristiky označované jako pásmo neklidu, resp. mez stability elektrického oblouku. Na základě experimentálního měření byla stanovena délka svodové dráhy pro simulaci meze stability elektrického oblouku $l_{arc} = 60$ mm s hodnotou obloukového napětí $u_0 = 816$ V a rezistencí elektrického oblouku $r_0 = 113 \Omega$. Pro tento případ jsou ionizační a rekombinační procesy v rovnováze (křivka E_2 na obr. 5-9). Pokud by byla dále zvětšována délka vzdálenosti elektrod,

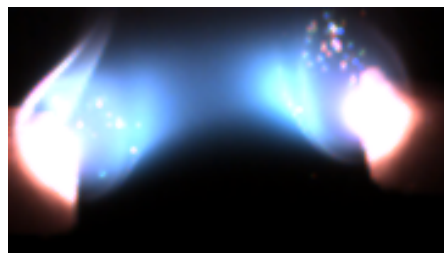
čemuž odpovídá zvýšení délky svodové dráhy elektrického oblouku, začíná převaha rekombinačních procesů a zaniká tvorba nových nosičů náboje z důvodu klesajícího přívodu energie do oblouku. K novému zapálení oblouku by došlo opět v případě překročení hodnoty zotaveného napětí nad hodnotu dielektrické pevnosti zbytkového plazmatu.

V okamžiku překročení hodnoty zotaveného napětí nad hodnotu dielektrické pevnosti prostředí svodové dráhy dochází k průrazu a zapálení obloukového výboje, což se projeví jednak strmým nárůstem hodnoty proudu, poklesem napětí fáze s poruchou a taktéž deformací napětí fází bez poruchy.

Pro lepší názornost byly pomocí vysokorychlostní kamery zachyceny snímky elektrického oblouku pro stabilní hoření mezi elektrodami viz.obr.5-10 a mez stability hoření viz.obr.5-11.



obr.5-10 Stabilní hoření el. oblouku



obr.5-11 Mez stability hoření el. oblouku

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zkoumat elektrický oblouk hořící mezi elektrodami a jeho chování při různých parametrech napájecí sítě. Dále byla část této práce věnovaná protiobloukové ochraně PO1, vyvinuté na katedře elektroenergetiky VŠB-TUO a testování reakce této ochrany při obloukové poruše. V rámci této diplomové práce byla provedena praktická měření v laboratoři HARD VŠB-TUO katedry elektroenergetiky, jakož i porovnání a doplňování již dříve vyhodnocených měření a experimentů.

V úvodních kapitolách této práce bylo zpracováno nezbytné základní uvedení do problému elektrických výbojů v energetické soustavě, respektive rozbor VN sítí. Tyto kapitoly slouží jako studijní základ, bez kterého by nebylo možno smysluplně vstoupit do problematiky měření parametrů elektrického oblouku a jsou proto pro praktická měření nezbytná.

Jsou zde uvedeny příklady nejčastěji používaných senzorů, sloužících pro identifikaci elektrické obloukové poruchy, díky kterým vlastně protioblouková ochrana získá prvotní informaci o měřeném prostředí. Dá se tedy hovořit o důležitém základním prvku každé protiobloukové ochrany. Ve druhé kapitole je pak zpracován rozbor nejčastěji používaných soustav VN sítí.

Tato kapitola slouží k objasnění základních vlastností VN sítí uzemněných přes odpor nebo indukčnost a slouží pro lepší pochopení základů fungování provozu těchto sítí. Díky těmto výchozím informacím lze snáze pochopit chování elektrického oblouku při poruše v jedné z uvedených sítí. V následující třetí kapitole je pak popsána zkoumaná protioblouková ochrana PO1 a její základní funkční vlastnosti.

Výše uvedené 3 kapitoly byly zaměřeny především teoreticky a sloužily k nastudování problému. V kapitole 4 je již popisovaný praktický návrh pracoviště pro ověření funkce zkoumané protiobloukové ochrany a návrh fyzikálního modelu sítě použitého v experimentu. Pro simulaci reálné VN sítě bylo nutno vypočítat parametry soustavy jako kapacitní proud soustavy, návrh kompenzační tlumivky a velikost uzlového odporníku. Takto navržené experimentální pracoviště bylo doplněno o vysokorychlostní kameru MotionPro X3, která sloužila pro pořizování snímků hořícího oblouku mezi elektrodami.

Hlavní praktickou část diplomové práce reprezentuje kapitola 5, ve které bylo provedeno množství experimentů a porovnávání s již dříve získanými výsledky nejrůznějších experimentů. Při ověřování funkce protiobloukové ochrany bylo vyhodnocováno chování přístroje při vysokoohmové a nízkoohmové obloukové poruše a z naměřených výsledků vyplývá

jednoznačně vysoká citlivost ochrany PO1. Další část praktického experimentu se zabývá parametry oblouku v závislosti na vzdálenosti elektrod a určováním meze stability hoření elektrického oblouku. Díky oddalování elektrod, mezi kterými oblouk hoří byla provedena simulace jednopólové zemní poruchy, tedy poruchy s nikoli konstantní, ale časově proměnou změnou rezistence. Posouzení tohoto typu zemní poruchy je velmi obtížné, což je dáno samotnou podstatou elektrického oblouku, jelikož se jedná o prvek s dynamickou a stochastickou charakteristikou.

V rámci této diplomové práce byl sestaven fyzikální model, díky kterému bylo možno zkoumat reakci protiobloukové ochrany na hladině nízkého napětí. Při respektování parametrů NN sítě a přizpůsobení se nárokům VN sítě, je však tento fyzikální model použitelný i na aplikaci protiobloukové ochrany na hladinu VN. Při přepočtu v poměrných jednotkách by vztažnou jednotkou byl například zkratový výkon, případně napětí sítě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Karel Sokanský: Volně hořící elektrický oblouk a možnosti jeho identifikace v elektrizační soustavě/ 1998 Ostrava
- [2] Chmelík: Technická diagnostika el. strojů a kabelů/ skriptum/ VŠB-TU Ostrava 2007/ elektronická podoba
- [3] Ing. Orság František: Možnosti identifikace vysokoimpedančního oblouku vysokého napětí v rozvodných zařízeních/ disertační práce/ VŠB-TU Ostrava 2000
- [4] Ing. Dušek Petr: Využití impulzní diagnostiky při lokalizaci zemního spojení v sítích vysokého napětí / disertační práce / VŠB-TU Ostrava 2004
- [5] Ing. Mišák Stanislav, Ph.D.: Analýza poruchových dějů v průmyslových vn rozvodech / habilitační práce / VŠB-TU Ostrava 2009
- [6] Ing. Orság František: Diagnostika elektrických výbojů v sítích vysokého napětí / disertační práce / VŠB-TU Ostrava 2007
- [7] Gallus Jiří: Interpretace obloukové zemní poruchy v kabelové VN síti / diplomová práce / VŠB-TU Ostrava 2008
- [8] Ing. Vaněk Roman: Problematika přechodových jevů souvisejících se zemním spojením v sítích 22kV / disertační práce / VŠB-TU Ostrava 2006
- [9] Ing. Válek Pavel: Využití impulzní diagnostiky při lokalizaci místa zemního spojení v sítích vysokého napětí / disertační práce / VŠB-TU Ostrava 2004
- [10] Ing. Karas Jiří: Vyhodnocování diagnostických měření částečných výbojů/ disertační práce / VŠB-TU Ostrava 2007

- [11] Ing. Potáček Lukáš: Měřicí systém pro registraci atmosférických a spínacích přepětí v energetické síti/ disertační práce / VUT Brno 2009
- [12] Manuál firmy ABB – Arc guard system /1SFA663007R1001 Edition 1/ Listopad 2003/ elektronická podoba
- [13] Kamera MotionPRO X/ Uživatelská příručka/ Redlake alliance 2008/ elektronická podoba
- [14] Bc. Caputa Petr: Nové diagnostické metody pro zjišťování aktuálního stavu el. Zařízení/ bakalářská práce/ VŠB-TU Ostrava 2008
- [15] Ing. Mišák Stanislav, Ph.D.: Diagnostika elektrického oblouku/ skriptum/ VŠB-TU Ostrava 2006/ elektronická podoba